



Dani Kuivinen

Yliaallot ja niiden vaikutus Carunan verkkoon

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Helsingissä 9.9.2018

Valvoja: Prof. Matti Lehtonen

Ohjaajat: DI Petri Kaerla, Jaana Varis



Tekijä Dani Kuivinen

Työn nimi Yliaallot ja niiden vaikutus Carunan verkkoon

Koulutusohjelma Automaatio ja sähkötekniikka

Pääaine Sähköenergiatekniikka

Koodi ELEC3024

Työn valvoja Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaajat DI Petri Kaerla, Jaana Varis

Päivämäärä 9.9.2018

Sivumäärä 7+66

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Sähköverkkoon kytketään yhä enemmän yliaaltoja tuottavia laitteita. Yliaallot vaikuttavat haitallisesti verkkoon aiheuttamalla enemmän sähköisiä häviöitä verkon johtimissa ja komponenteissa sekä alentamalla näiden käyttöikää.

Työssä tarkastellaan Carunan sähköverkon yliaaltopitoisuutta ja yleisimpiä yliaaltojen lähteitä. Tuuli- ja aurinkovoimalat, sekä sähköautojen latauspisteet tuottavat tunnetusti yliaaltoja. Näitä tutkitaan tässä työssä ja niiden vaikutusta verkkoon arvioidaan.

Yliaaltoja tutkitaan tässä työssä erilaisilla laatumittareilla. Mittauksia on suoritettu aiemmin Carunan sähköverkossa, joita hyödynnetään työssä. Tämän lisäksi työn aikana suoritetaan laatumittauksia sähköautojen latauspisteellä ja aurinkopaneeleja sijaitsevassa verkossa.

Työssä tutkitaan yliaaltojen kulkeutumista sähköverkossa sekä arvioidaan niistä aiheutuneiden häviöiden määrää ja kustannuksia verkkoyhtiölle. Lopussa pohditaan menetelmiä, joiden avulla voidaan jatkossa seurata yliaaltoja Carunan verkossa ja tunnistaa potentiaalisia yliaaltoja tuottavia kohteita.

Avainsanat yliaalto, sähköverkko, tuulivoima, aurinkopaneeli, sähköauto, häviöt



Author Dani Kuivinen

Title of thesis Harmonics and their impact on Caruna's grid

Degree programme Automation and Electrical Engineering

Major Electrical Power and Energy Engineering

Code ELEC3014

Thesis supervisor Prof. Matti Lehtonen

Thesis advisors M.Sc. (Tech.) Petri Kaerla, Jaana Varis

Date 9.9.2018

Number of pages 7+66

Language Finnish

Abstract

Devices that produce harmonics are increasingly connected to the power grid. Harmonics affects harmfully the grid due resulting more electric loss in conductors and components as well as decreasing their lifecycle.

This thesis examines the concentration of harmonics in Caruna's power grid and their most common sources. Wind and solar power as well as electric car charging stations are well-known to produce harmonics. These are studied in this thesis and their impact on the grid is estimated.

Harmonics are studied in this thesis using different power quality meters. Power quality measurements have already been conducted in Caruna's power grid, which are exploited in this thesis. In addition to this power quality measurements are conducted at electric car charging station and at solar panel implemented part of the grid.

The migration of harmonics in the power grid is studied in this thesis as well as their effect on electric loss and costs to the network company are estimated. Finally, methods are considered to monitor harmonics in Caruna's grid and to identify potential producers of harmonics.

Keywords harmonics, power grid, wind power, solar panel, electric car, loss

Alkusanat

Diplomityö on tehty Caruna Oy:n toimeksiannosta osana diplomi-insinöörin tutkintoa Aalto yliopistossa Sähkötekniikan korkeakoulussa.

Haluan kiittää ohjaajiani Petri Kaerlaa ja Jaana Varista ohjauksesta sekä työhön liittyvän aineiston tarjoamisesta. Erityiskiitos Jaanalle diplomityön aiheen ehdottamisesta. Kiitän professori Matti Lehtosta työn valvomisesta ja avusta työn haasteiden selvittämisessä. Mattia kiitän myös hyvistä luennoista vuosien ajalta ja kiinnostukseni herättämisestä sähköverkkoja kohtaan. Lisäksi haluan kiittää Carunan henkilökuntaa avustaan työn aihealueen kokoamisessa ja materiaalin hankkimisessa, sekä Carunan yhteistyöurakoitsijoita ja partnereita mittalaitteiden asentamisesta.

Helsingissä 9.9.2018

Dani Kuivinen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Abstract	iii
Alkusanat	iv
Sisällysluettelo	v
Merkinnät	vi
Lyhenteet ja määritteet	vii
1 Johdanto	1
2 Yliaallot	3
2.1 Yliaaltojen lähteet	5
2.1.1 Puolijohdetekniikka	5
2.1.2 Valokaaret	6
2.1.3 Muuntajat ja moottorit	9
2.2 Yliaaltoja tuottavat kuormat	11
2.2.1 Paikallinen tuotanto	11
2.2.2 Sähköautot	12
2.2.3 Sähkövarastot	15
2.3 Yliaaltojen vaikutukset	16
2.3.1 Verkon komponentit	16
2.3.2 Verkkoon kytketyt laitteet	17
2.4 Resonanssit	18
2.5 Yliaaltojen suodattaminen	19
3 Sähkönlaatu	20
3.1 Harmoniset yliaaltojännitteet	20
3.2 Harmoniset yliaaltovirrat	22
3.3 Epäharmoniset yliaallot	24
4 Mittausmenetelmät	25
4.1 Laatumittaukset	25
4.2 Erikoismittaukset	25
5 Yliaallot Carunan verkossa	26
5.1 Kaupunki- ja haja-asutusalueen vertailu	28
5.2 Tuulivoimalat	30
5.3 Aurinkopaneelit	34
5.4 Sähköautojen latauspisteet	39
5.5 Yliaaltojen lähteet ja kulkeutuminen	43
6 Yliaaltojen vaikutus Carunan verkkoon	47
6.1 Yliaalloista aiheutuvat häviöt	47
6.1.1 Johtimet	47
6.1.2 Muuntajat	53
6.2 Yliaalloista aiheutuvat kulut	56
6.3 Yliaaltojen seuranta jatkossa	60
7 Yhteenveto	62
8 Lähdeluettelo	64

Merkinnät

Symbolit

B	magneettivuon tiheys
C	kapasitanssi
f	taajuus
H	magneettikentän voimakkuus
I	virta
I_L	kuormavirta
I_{SC}	oikosulkuvirta
j	imaginaariyksikkö
k	materiaalista riippuva vakiokerroin
k_h	lisähäviöiden korjauskerroin hystereesissä
L	induktanssi
n	harmonisen yliaallon kertaluku
P	teho
P_A	verkkoon liitettävän aurinkopaneelin suurin sallittu teho
P_h	tehohäviö
P_{It}	välkynnän pitkäaikainen häiritsevyysindeksi
Q_C	kompensointikondensaattorin loisteho
R	resistanssi
R_j	johtimen yliaaltoriippuvainen resistiivisyys Ω/km
R_n	muuntajan yliaaltoriippuvainen resistanssi Ω
R_0	tasavirtaresistiivisyys tai tasavirtaresistanssi
S_N	muuntajan nimellisteho
S_{SC}	oikosulkuteho
t	aika
U_p	pääjännite
U_v	vaihejännite
V	jännite
θ	vaihekulma
ω	kulmataajuus

Operaattorit

bei	ensimmäisen lajin Besselin funktion imaginaariosa
ber	ensimmäisen lajin Besselin funktion reaaliasa
Σ_n	summa indeksin n yli

Lyhenteet ja määritteet

Lyhenteet

AMKA	alumiininen PE-päällystetty ilmajohto
AMCMK	alumiininen PVC-eristeinen maakaapeli
AXMK	alumiininen XLPE-eristeinen maakaapeli
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LED	Light-Emitting Diode
MCMK	kuparinen PVC-eristeinen maakaapeli
PWM	Pulse-Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
TDD	Total Demand Distortion, kokonaiskuormansärökerroin
THD	Total Harmonic Distortion, kokonaissärökerroin
UPS	Uninterruptible Power Supply, katkeamaton virransyöttö

Määritteet

Keskijännite:	Määritellään Suomessa kaikki jännitteet 1–36 kV
Käyttöpaikka:	Liittymän alle perustettu sähkönkulutuksen mittauspiste.
Liittymä:	Sähkönkulutuspiste sähköverkon näkökulmasta. Yhden liittymän alle voidaan perustaa useampi käyttöpaikka.
Loisteho:	Kertoo jännitteen ja virran vaihe-erosta johtuvasta tehon määrästä, joka on näennäistehon ja pätötehon neliöllinen erotus. Loisteho ei kuljeta työhön hyödynnettävää tehoa, vaan sen teho värähtelee sähköverkon ja kuorman välissä.
Muuntopiiri:	Muuntamon syöttämä pienjänniteverkko, johon liittymät liitetään.
Oikosulkuvirta:	On sähköverkosta saatava virta, jos liittymässä sattuu oikosulku. Oikosulkuvirran suuruus kertoo sähköverkon vahvuudesta.
Pienjännite:	Määritellään Suomessa kaikki jännitteet ≤ 1 kV
Suurjännite:	Määritellään Suomessa kaikki jännitteet > 36 kV
Tehokerroin:	Kertoo pätötehon suhteesta näennäistehoon.
TDD:	Kertoo virran säröytyneen osan suuruudesta verrattuna kuorman suurimpaan kuormavirtaa.
THD:	Kertoo signaalin säröytyneen osan suuruudesta verrattuna signaalin perusaaltoon.

1 Johdanto

Sähköverkkoon liitetty kuorma on muuttunut merkittävästi viime vuosien aikana. Perinteisesti kuluttaja-asiakas kulutti sähköä pääasiassa lämmitykseen, valaistukseen ja muutamisiin sähköisiin laitteisiin. Sähkölämmityksen suosio on laskussa, jota korvaa muut lämmitysmuodot kuten maalämpö ja lämpöpumput sekä kaupunkialueilla kaukolämpö. Yksinkertaisten hehkulamppujen tilalle on otettu käyttöön loisteputki- sekä energiasäästölamppuja kuten LED-valaisimia. Nykyisin sähköinen varustetaso on myös kehittynyt ja sen osuus on kasvanut asiakkaan kuluttamasta kokonaiskuormasta. Sähkönkulutus on siis monimuotoistunut eikä kuluttaja-asiakkaan sähkökuorma enää vastaa perinteistä puhdasta resistiivistä kuormaa. Tämä tuo mukanaan uusia ongelmia sähkönlaadun suhteen, sillä useimmat nykyisin käytettävät laitteet tuottavat häiriötä verkkoon.

Sähköntuotannossa pyritään siirtymään ympäristöystävällisempiin tuotantomuotoihin kuten tuuli- ja aurinkovoimaan. Viime vuosisadalla hiili- ja muut polttovoimalat tuottivat suurimman osan sähköstä. Niiden toiminta on yksinkertainen ja helposti säädettävä. Voimalassa tuotetaan sähköä sen verran kuin kulutus sillä hetkellä sitä vaatii, jolloin sähköverkossa tehotasapaino pysyy vakiona. Nykyisin suuressa kasvussa olevat tuuli- ja aurinkovoimalat eivät kykene tähän tehotasapainon ylläpitoon itsessään, vaan vaativat suoranaista ohjausta tai ulkoisen järjestelmän säilyttääkseen tasaisen sähköntuotannon. Tämän tehotasapainon toteuttavat menetelmät usein myös tuottavat sähkönlaadullista häiriötä verkkoon.

Sähkönjakeluverkossa on nähty muutoksia kuluttajien sähkönkäytön suhteen. Ennen sähköä tuotiin pitkän matkan päästä voimalaitoksilta kuluttajille, mutta nykyisin sähköä tuotetaan myös kuluttajien päässä. Kuluttaja-asiakkaiden keskuudessa asennetaan kasvavalla vauhdilla aurinkopaneeleja talon katolle. Tämä paikallinen sähköntuotanto tuo myös sähkönlaadun kannalta olevat häiriöt lähemmäs asiakasta ja niiden poistaminen verkosta hankaloituu. Aurinkopaneelien lisäksi sähköautojen suosio on selvässä kasvussa. Sähköautojen latauspisteet ovat tehollisesti hyvin suuria ja vaativat uuden kaltaista mitoitus-suunnittelua sähkönjakeluverkossa. Myös sähköautojen latauslaitteet tuottavat häiriötä sähkönlaatuun verkossa. Kuluttaja-asiakkaiden lisäksi yritykset ovat innostuneet investoimaan paikalliseen tuotantoon sekä sähköautojen latauspisteisiin. Yritysasiakkaiden oma sähköntuotanto tai sähköautojen latauspiste voi olla tehollisesti hyvin suuri. Tällöin verkkoon voi siirtyä merkittävä määrä häiriötä, joka aiheuttaa lähiverkossa sähkönlaadun alenemaa.

Yliaaltojen esiintyminen sähköverkossa on merkittävä tekijä sähkönlaadun alenemisessä. Yliaallot vaikuttavat verkon perustaajuuden signaalin puhtauteen, jonka laadun takaaminen on yksi sähkönsiirto- ja -jakeluverkon perusedellytys. Monet nykypäivät laitteet ja verkkoon kytketyt epälineaariset kuormat tuottavat yliaaltoja, jotka voivat aiheuttaa sähköverkossa harmia sähkönlaatuun. Yliaallot aiheuttavat sähkönlaadun laskun lisäksi myös muita häiriöitä verkossa ja verkkoon kytketyissä laitteissa. Sähköverkossa yliaaltojen vaikutukset näkyvät selvimmin ylimääräisissä häviöissä ja komponenttien nopeammassa ikääntymisessä. Verkkoon kytketyissä laitteissa näiden ongelmien lisäksi voidaan kokea toimintahäiriöitä. Yliaaltojen esiintyminen sähköverkossa on pääasiallisesti aina ei-haluttua ja niiden hävittäminen verkosta tuo niin teknistaloudellista hyötyä verkon omistajille sekä käyttäjille.

Tässä työssä tutkitaan yliaaltojen määrää ja niiden aiheuttamaa häiriötä sähköverkkoon. Alussa määritellään yliaallot ja esitellään niiden yleisimmät lähteet. Teoriaosuudessa tarkastellaan tarkemmin tehtyjä tutkimuksia tuulivoimaloiden ja sähköautojen latauspisteiden tuottamista yliaalloista. Sähkönlaadun määritteet esitellään yliaaltojen kannalta, jotka pohjautuvat Suomessa ja kansainvälisesti käytettyihin standardeihin. Työssä tehdään yleiskatsaus sähköverkon yliaaltopitoisuuteen ja sitä verrataan standardien määrittämiin raja-arvoihin. Tarkastelua tehdään pääosin pienjänniteverkossa, mutta myös keski- ja suurjännitteen kohteita tutkitaan. Yliaaltopitoisuuden vaikutusta arvioidaan ja sen lähteitä pohditaan. Työssä tarkastellaan tarkemmin kohteita, joiden yleisesti tunnetaan olevan yliaaltojen tuottajia. Näitä ovat sähköntuotannossa tuuliturbiinit ja aurinkopaneelit sekä kasvussa olevat sähköautojen latauspisteet. Saatuja tuloksia verrataan tehtyjen tutkimuksien ja teorian ennustamiin tuloksiin. Työssä mietitään yliaaltojen kulkeutumista sähköverkossa ja vertaillaan eri verkkoaluetyyppien yliaaltopitoisuuksia. Lisäksi arvioidaan yliaalloista aiheutuneiden häviöiden määrää ja niiden kustannuksia verkkoyhtiölle. Lopuksi pohditaan tarvetta jatkossa yliaaltojen seurannassa ja tutkimisessa sähköverkon näkökulmasta.

Tämä työ on tehty sähköverkkoyhtiölle Carunalle. Caruna on Suomen suurin sähköjakeluyhtiö, joka kattaa noin 20 % markkinaosuuden Suomen sähköjakelusta. Yhtiö on jaettu kahteen verkkoalueeseen Caruna Oy ja Caruna Espoo Oy. Caruna Oy omistaa verkkoa Keski-Uudenmaalta, Länsi-Uudenmaalta, Kanta-Hämeestä, Varsinais-Suomesta, Satakunnasta, Pohjanmaalta, Koillismaalta ja Lapista. Caruna Espoo Oy omistaa verkon Espoon, Kauniaisen, Kirkkonummen ja Joensuun keskustan alueelta. Sähköverkkoa on yhteensä noin 85000 kilometriä, joka tuo sähköä 1,5 miljoonalle suomalaiselle. Carunan verkko koostuu suurimmakseen ilmajohdosta, mutta yhtiöllä on käynnissä mittavat maakaapelointiprojektit. Verkon kaapelointiaste oli vuonna 2017 noin 45 %, joka on noussut paljon kahden vuoden takaisesta 36 % kaapelointiasteesta.

Yliaaltoja tutkitaan tässä työssä pääasiallisesti laatumittarien avulla. Näitä mittauksia on tehty useimmiten asiakkaiden pyynnöstä sähkönlaadun varmistamiseksi ja toisinaan verkkoyhtiön toimesta moniin kohteisiin eri puolilla Suomea. Laatumittauksien dataa on kerätty vuodesta 2012 lähtien ja niiden avulla saa hyvän yleiskuvan verkon sähkönlaadusta. Työn aikana myös suoritetaan laatumittauksia potentiaalisissa yliaaltoja tuottavissa kohteissa kuten sähköautojen latausasemalla ja aurinkopaneeleita sijaitsevalla alueella. Työssä hyödynnetään Carunan käytössä olevaa verkkotietojärjestelmää, jonka avulla saadaan tarvittavat tiedot liittymistä ja verkon komponenttien teknisistä arvoista.

Tämän työn tarkoituksena on saada yleiskäsitys Carunan sähköverkon yliaaltopitoisuudesta ja sen aiheuttajista, sekä käsitystä yliaalloista koituvista haitoista verkkoyhtiölle ja kuluista. Työn halutaan myös herättävän ajatuksia ja keskustelua verkkoyhtiöissä yliaaltojen mahdollisesta lisääntymisestä verkossa, sekä toimista niiden ehkäisemiseen ja verkon suojaamiseen. Carunan verkossa ei ole aiemmin tehty tutkimusta yliaaltojen määrästä ja niiden vaikutuksesta. Verkkoon kytkettyjen yliaaltoja tuottavien laitteiden määrän kasvaessa on verkkoyhtiön näkökulmasta hyvä tehdä esiselvitys nykyisestä yliaaltopitoisuudesta, sekä tutkia näiden laitteiden synnyttäviä yliaaltoja.

2 Yliaallot

Yliaallolla sähkönjakeluverkossa tarkoitetaan signaalia, jonka jännitteen tai virran taajuus on eri kuin verkon perustaajuus. Sähköverkon perustaajuus on joko 50 Hz tai 60 Hz. Suomessa käytetään muun Euroopan tapaan 50 Hz perustaajuutta. Yliaallot jaetaan harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmonisten yliaaltojen taajuus on monikerta verkon perustaajuudesta, esim. toisen kertaluvun harmonisen yliaallon taajuus on 100 Hz, kolmannen 150 Hz jne. 60 Hz perustaajuisessa sähköverkossa harmoniset yliaallot ovat vastaavasti 120 Hz, 180 Hz jne. Epäharmonisten yliaaltojen taajuus on kaikki taajuudet perustaajuuden ja sen monikertojen välissä.

Harmoniset yliaallot voidaan jakaa edelleen symmetrisiin komponentteihin, jotka ovat positiivinen-, negatiivinen- ja nollakomponentti. Näitä kutsutaan myös myötä-, vasta- ja nollajärjestelmäksi. Symmetrisillä komponenteilla voidaan kuvata epäsymmetrinen järjestelmä, laskemalla symmetristen komponenttien vektorisuureet yhteen. Tämä helpottaa epäsymmetrisien järjestelmien analysointia. Symmetriset komponentit määritellään seuraavasti:

- Positiivinen komponentti, eli myötäjärjestelmä, pyörii samaan suuntaan kuin perustaajuuden vaiheosoitin.
- Negatiivinen komponentti, eli vastajärjestelmä, pyörii vastakkaiseen suuntaan kuin perustaajuuden vaiheosoitin.
- Nollakomponentti, eli nollajärjestelmä, ei pyöri, sillä sen kaikki vaiheet osoittavat samaan suuntaan.

Kolmivaiheisessa sähköjärjestelmässä kaikki vaiheet ovat 120° kulmassa toisiaan nähden. Nämä vaiheet merkitään yleensä L1, L2 ja L3, missä L2 on 120° edellä vaihetta L1 ja L3 puolestaan on 120° jäljessä vaihetta L1. Yliaallot eri vaiheissa voidaan esittää seuraavasti;

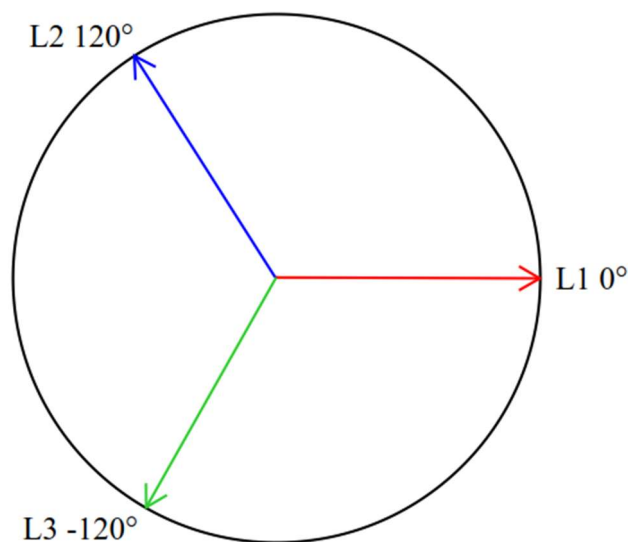
$$F_{L1} = \sin(n\omega t + n \cdot 0^\circ + \theta_n) \quad (1)$$

$$F_{L2} = \sin(n\omega t + n \cdot 120^\circ + \theta_n) \quad (2)$$

$$F_{L3} = \sin(n\omega t - n \cdot 120^\circ + \theta_n) \quad (3)$$

joissa n on yliaallon harmoninen kertaluku, ω on kulmataajuus, t on aika ja θ_n on yliaallon vaihesiirtymä. Harmoninen kertaluku n kasvattaa signaalin värähtelytaajuutta kuten myös vaiheosoittimen suuntaa. Kertaluvun $n = 2$ harmoninen yliaalto värähtelee kaksi kertaa nopeammin kuin perustaajuuden signaali, jolloin sen vaiheosoitin myös kulkee kaksi kertaa pidemmälle. Kuvassa 1 on esitetty kolmivaihejärjestelmän eri vaiheet. Kaa-vojen 1–3 avulla voidaan määrittää harmonisten yliaaltojen kertalukujen komponenttien merkit. Ensimmäinen harmoninen yliaalto, eli perustaajuus, saa kertaluvun $n = 1$, jolloin L1 osoittaa suuntaan 0° , L2 suuntaan 120° ja L3 suuntaan -120° . Tällöin vaiheet osoittavat perustaajuuden suuntaan ja järjestelmä pyörii myötäsuuntaisesti, eli ensimmäinen harmoninen yliaaltokomponentti on positiivinen. Vastaavasti, kun $n = 2$, niin L1 osoittaa edelleen 0° suuntaan, mutta L2 osoittaa 240° suuntaan, joka vastaa arvoa -120° . L3 puolestaan saa arvon -240° , joka vastaa arvoa 120° . Tämän näkee kuvasta 1 siten, että vaiheet L2 ja L3 kiertävät kehää 120° askelina, jolloin tapauksessa $n = 2$ vaihe L2 kiertää 240°

vastapäivään ja pysähtyy perustaajuuden L3 paikalle. Vaihe L3 tekee päinvastaisen, eli pyörii -240° myötäpäivään ja pysähtyy perustaajuuden L2 paikalle. Tällöin vaiheiden järjestys on muuttunut ja toisen kertaluvun harmoninen yliaalto pyörii vastasuuntaan verrattuna perustaajuuteen, eli toinen harmoninen yliaaltokomponentti on negatiivinen. Lopuksi vielä tapaus, kun $n = 3$. Tällöin L1 saa edelleen arvon 0° , mutta myös L2 ja L3 saavat arvon 0° . Molemmat vaiheet kiertävät nyt kolme kertaa 120° askeleen, jolloin ne pysähtyvät vaiheen L1 paikalle. Tässä tilanteessa kaikki vaiheet osoittavat samaan suuntaan eikä järjestelmä pyöri, eli kyseessä on nollakomponentti. Suuremille harmonisille kertaluvuille voidaan laskea samalla periaatteella komponentin merkki. Taulukossa 1 on esitetty harmonisten kertalukujen taajuudet ja niiden komponentin merkki.



Kuva 1: Symmetrisen kolmivaihejärjestelmän vaiheosoittimet.

Taulukko 1: Harmoniset yliaallot ja niiden komponentit.

Kertaluku	perus	2	3	4	5	6	7	8	9
Taajuus (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
	60	120	180	240	300	360	420	480	540
Komponentti	+	–	0	+	–	0	+	–	0

Harmonisen yliaallon komponentin merkki vaikuttaa siihen, kuinka yliaalto vaikuttaa verkkoon. Positiivinen komponentti aiheuttaa verkossa lisähäviöitä [1] ja moottoreissa ne pyrkivät nopeuttamaan moottorin pyörimistä [2]. Negatiivinen komponentti puolestaan pyrkii hidastamaan moottoreita ja se aiheuttaa myös lisähäviöitä [1], [2]. Nollakomponentin osoittimet eivät pyöri, joten ne eivät vaikuta muiden komponenttien tavoin moottoreiden vääntöön. Parittomia nollakomponentteja (eli 3, 9, 15, 21 jne.) kutsutaan kolmansiksi harmonisiksi yliaalloiksi, sillä ne ovat kolmella jaollisia harmonisia yliaaltoja. Kolmannet yliaallot ovat erityisen vahingollisia, koska ne summautuvat yhteen verkon nollajohtimessa [1], [2], [3]. Ne eivät kumoa toisiaan kuten positiiviset ja negatiiviset komponentit

tekevät osittain [1], [2]. Verkossa nollajohdin, eli neutraali, on tarkoitettu nimensä mukaan pysyä sähköisesti tyhjänä. Nollakomponentit kuitenkin aiheuttavat nollajohtimeen virtapiikkejä, jotka voivat olla vaaraksi.

Yliaaltoja käsitellään matemaattisesti Fourier-analyysin avulla. Teoreema sanoo, että säännöllisesti jatkuvat funktiot voidaan jakaa sinimuotoisiin komponentteihin. Fourier-muunnoksessa siirrytään aikatasosta taajuustasoon, jolloin signaalin aaltomuoto jaetaan taajuuskomponentteihin. Näiden komponenttien amplitudi ja vaihe ratkeavat samalla, jolloin alkuperäisen signaalin voi rekonstruoida komponenteista. Nämä komponentit antavat tärkeää tietoa signaalin rakenteesta ja mahdollisista yliaalloista.

Yksi tärkeä määrite yliaaltojen tutkimisessa on kokonaissärökerroin (THD: total harmonic distortion). Tämä määritellään signaalin taajuuskomponenttien tehollisarvoista kaavalla,

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_2^n F_n^2}}{F_1} \quad (4)$$

missä F_n on kertaluvun n harmoninen yliaaltokomponentti ja F_1 on perustaajuuden tehollisarvo. THD kuvaa signaalin säröytyneen osan määrää suhteessa perustaajuuteen. Se antaa hyvän käsityksen perustaajuuden signaalin laadusta.

2.1 Yliaaltojen lähteet

Useat sähköverkkoon kytketyt laitteet tuottavat yliaaltoja. Näiden lähteenä toimivat epälineaariset kuormat. Kuorman epälineaarisuus tarkoittaa yksinkertaisuudessaan sitä, että kuorma muuttaa ottamansa sähköön taajuuden ominaisuuksia. Tällaisia ovat esimerkiksi puolijohdetekniikalla toimivat laitteet ja valokaaria tuottavat laitteet. Lineaarisiksi luokiteltavat laitteet, kuten muuntajat ja moottorit, tuottavat myös yliaaltoja. Näissä laitteissa magnetisoitu materiaali käyttäytyy epälineaarisesti ja siksi ne myös voivat tuottaa yliaaltoja [4]. Verkkoon kytkettyjen epälineaaristen kuormien määrä on ollut suuressa kasvussa. Vuonna 1992 arvioitiin, että kuorman epälineaarisuuden määrä kokonaiskuormasta on 15–20 %, joka on vastaavasti nykyisin arvioitu olevan 50–70 % [5]. Yliaaltojen lähteet ovat siis selvässä kasvussa ja niillä on suuri vaikutus verkkoon ja sähkönlaatuun.

2.1.1 Puolijohdetekniikka

Puolijohdetekniikkaa hyödyntäviä laitteita kytketään verkkoon yhä suuremmalla volyyymilla ja ne ovat yksi merkittävin yliaaltojen lähde [4]. Useat kuluttajien laitteet, kuten tietokoneet, viihdelaitteet ja älypuhelimien laturit hyödyntävät puolijohdetekniikkaa. Puolijohdeteknillisiä komponentteja ovat esimerkiksi tasasuuntaajat, invertterit, taajuusmuuttajat ja tyristoriohjatut reaktorit [4], [6].

Tasasuuntaaja muuttaa sähkövirran vaihtovirrasta tasavirraksi. Tässä muunnon yhteydessä syntyy harmonisia ja epäharmonisia yliaaltoja, sillä muuntoprosessi ei ole ideaalinen. Tasasuuntaamisen yhteydessä käytettiin ennen muuntajia, joilla alennettiin verkosta otettu jännite halutulle tasolle [3]. Tällä oli tasoittava vaikutus tuotettuihin yliaaltoihin.

Nykyisin tasasuuntaajalaitteet kytketään suoraan verkkoon ja jännite alennetaan hakkuri-teholähteillä. Tällöin ei saada samankaltaista yliaaltoja tasoittavaa vaikutusta. Lisäksi hakkuteholähteet tuottavat myös itsessään yliaaltoja, sillä ne ovat epälineaarisia kuormia.

Invertteri, eli vaihtosuuntaaja, toimii kuten tasasuuntaaja, mutta toisinpäin. Sillä muunnetaan tasavirta vaihtovirraksi, ja kuten tasasuuntaaja, se tuottaa yliaaltoja. Invertterit ovat yksi tärkeistä tekijöistä yliaaltojen tutkimisessa, sillä niiden käyttö on kasvanut runsaasti viime aikoina [4]. Kuluttajat asentavat yhä enemmän aurinkopaneeleita, jotka kytketään sähköverkkoon invertterin kautta.

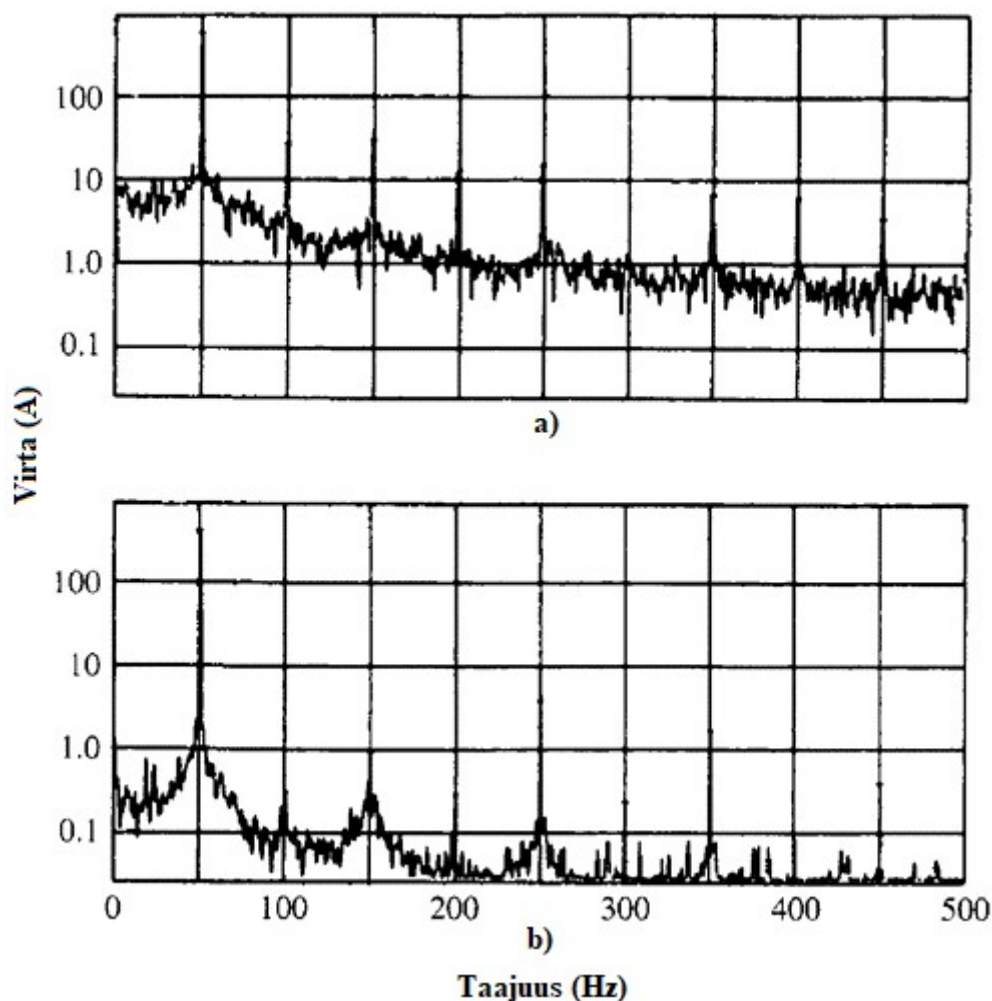
Taajuusmuuttajat ovat myös epälineaarista kuormaa ja tuottavat yhtä lailla yliaaltoja kuin suuntaajat. Ne muuntavat verkosta saadun vaihtovirran perustaajuuden halutuksi taajuudeksi ja tämä prosessi tuottaa yliaaltoja.

Tyristorihjattuja reaktoreita käytetään verkossa kompensoimaan loistehoa. Reaktoreita on monta eri tyyppiä, joista jokainen tuottaa yliaaltoja verkkoon [4]. Sähkönjakeluverkkoja kaapeloidaan nykyisin paljon, sillä verkosta halutaan kestävämpi säätelmiöitä vastaan. Yleisesti käytetyt 20 kV keskijännitemaakaapelit tuottavat jokaiselle vaiheelle 0,8–1,2 A/km kapasitiivista loisvirtaa [7], jolloin tarvitaan enemmän reaktoreita kompensoimaan ja yliaaltojen määrä nousee yhä sen yhteydessä.

2.1.2 Valokaaret

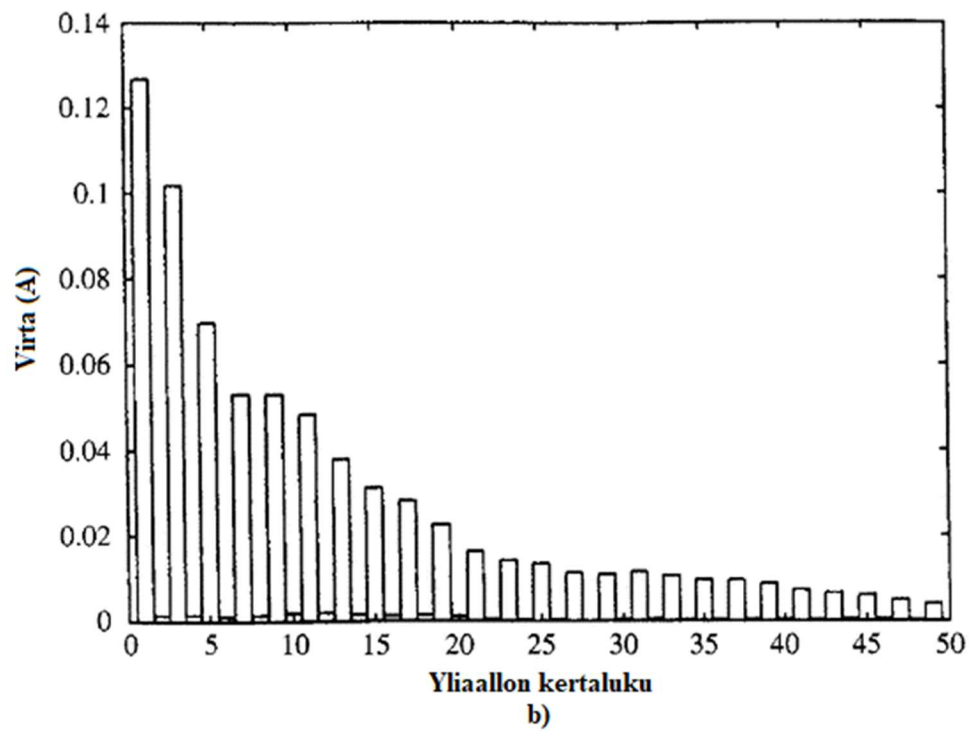
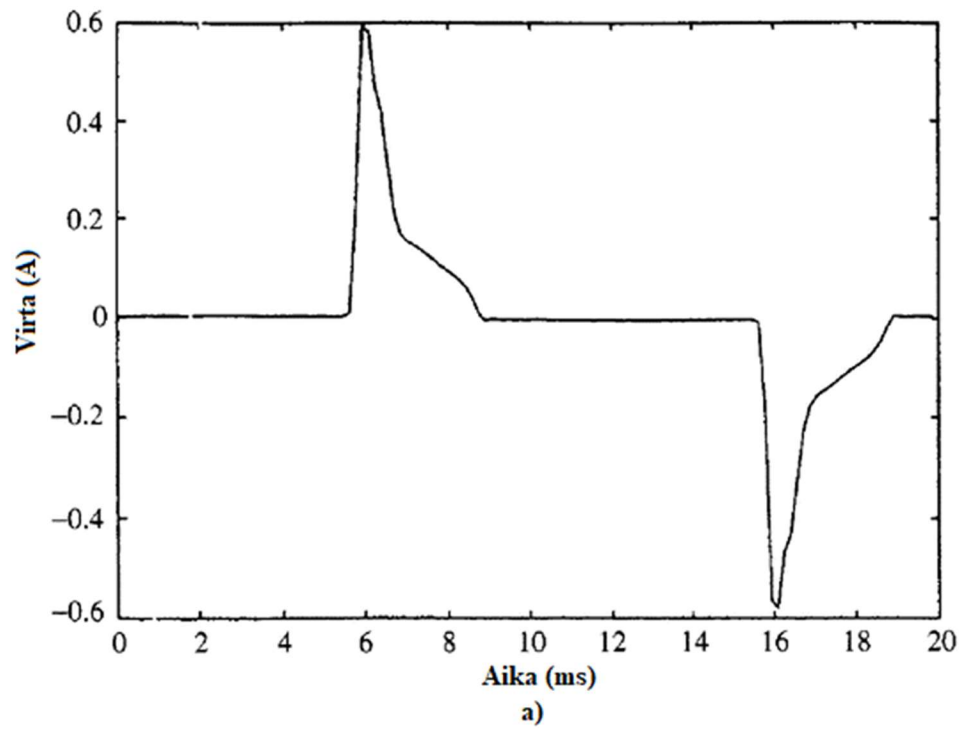
Valokaari syntyy, kun elektrodien välissä oleva sähkökenttä kasvaa niin voimakkaaksi, että se ionisoi elektrodien välissä olevan materiaalin. Tällöin sähkövirta pääsee kulkemaan elektrodilta toiselle, joka synnyttää näkyvän valokaaren. Valokaari tuottaa paljon valoa ja lämpöä, minkä vuoksi sitä hyödynnetään erilaisissa laitteissa ja prosesseissa. Valokaari käyttäytyy hyvin epälineaarisesti ja se aiheuttaa paljon yliaaltoja [4]. Yleisiä valokaarta hyödyntäviä laitteita ovat esimerkiksi valokaariuunit, purkauslamput ja hitsauslaitteet [4].

Valokaariuunia käytetään esimerkiksi metalliteollisuudessa sulattamaan metallia. Jännitteen ja virran ominaisuudet muuttuvat valokaarella sen kaaren pituuden funktiona. Valokaaren ollessa tasainen, valokaariuuni tuottaa suhteellisen tasaisesti harmonisia yliaaltoja. Kaaren pituuden vaihdellessa, etenkin metallin sulatusprosessissa, yliaaltoja syntyy vaihtelevasti laajalla spektrillä. Kuvassa 2 on esitetty valokaariuunin virtaspektri taajuuden funktiona. Sulatusvaiheessa virtaspektri on laaja ja spektrin piikit ilmestyvät harmonisille taajuuksille. Ylikuumennusvaiheessa, joka on sulatusvaiheen jälkeinen prosessi, metalli kuumennetaan juoksevaksi, jolloin yliaaltoja syntyy vähemmän epäharmonisilla taajuuksilla. Tämä johtuu siitä, että valokaari pysyy tasaisempaan sulassa metallissa kuin metallin sulatusvaiheessa, jossa metalli on osittain sulanut ja koostuu palasista. [3]



Kuva 2: Valokaariuunin virran säröytyminen a) sulatusvaiheessa b) ylikuumennus vaiheessa. [3]

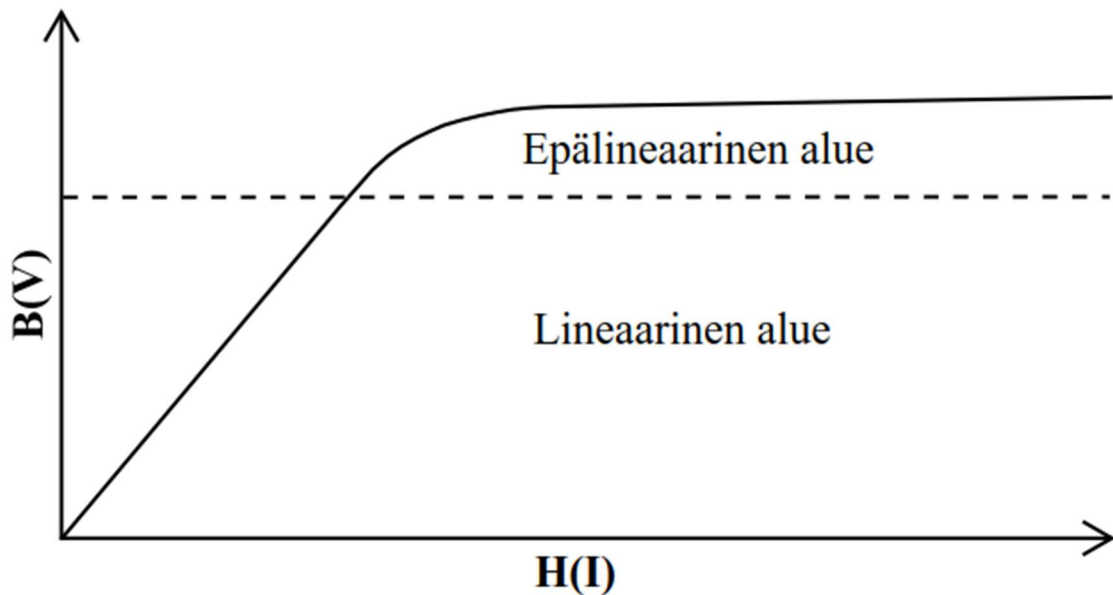
Purkauslamppuja käytetään yleisesti ja niiden tekniikka perustuu hallittuun valokaareen kaasussa lampun sisällä. Yleisiä purkauslamppuja ovat loisteputkivalot ja suurpainenatriumlampit. Loisteputkilamppuja käytetään paljon toimistoissa ja suurpainenatriumlampit katuvalaistuksessa. Loisteputkilampit ovat erityisesti huomattavia yliaaltojen lähteitä, sillä valokaaren aiheuttaman epälineaarisuuden lisäksi lampuissa käytetään kuristimia rajoittamaan virran suuruutta lampussa [3]. Kuristin on periaatteeltaan samanlainen kuin reaktori ja synnyttää myös yliaaltoja. Toimistoissa suuri osa sähkönkulutuksesta voi kulua loisteputkivalaistukseen, jolloin yliaaltojen määrä voi nousta kiinteistössä merkittäviin lukemiin. Kuvassa 3 nähdään purkauslampun tyypillinen virtamuoto ja sen harmoniset yliaaltokomponentit. Purkauslamput aiheuttavat runsaasti yliaaltoja, sillä niiden ottama virta on hyvin säröytynyt perustaajuisesta sinimuodosta.



Kuva 3: Purkauslampun virtamuoto a) ja sen harmoniset yliaaltokomponentit b). [3]

2.1.3 Muuntajat ja moottorit

Muuntajien ja moottorien toimintaa yleensä kuvataan lineaarisena. Molemmissa käytetään usein rautasydäntä, joka magnetisoidaan ympäröivillä käämityksillä. Alhaisella käyttöasteella rautasydän käyttäytyy lineaarisesti, mutta suuremmalla käyttöasteella sen magneettiset ominaisuudet alkavat muuttua epälineaariseksi [8]. Tämä johtuu siitä, että rautasydämessä magneettivuon tiheys B muuttuu magneettikentän voimakkuuden H funktiona. Nämä suureet puolestaan riippuvat syötetyn jännitteen ja virran määrästä, eli toisin sanoen muuntajaan tai moottoriin syötettävästä tehosta. Kuvassa 4 esitetään yksinkertaistetusti tämä riippuvuus.



Kuva 4: Magneettivuon tiheyden $B(V)$ riippuvuus magneettikentän voimakkuudesta $H(I)$.

Normaalissa käytössä muuntajat eivät tuota merkittävästi yliaaltoja [8]. Kuitenkin muuntajat halutaan kuormittaa lähellä niiden nimellistehoa, sillä muuntaja on kallis yksittäinen sähköverkon komponentti eikä niitä haluta rakennuttaa turhan suurina. Muuntajan rautasydämen kuormitettavuus voi jo normaalin käytön aikana siirtyä hieman epälineaariseen alueelle, jolloin se alkaa tuottamaan yliaaltoja. Nämä yliaallot ovat pääosin kolmansia harmonisia yliaaltoja (3, 6, 9, 12, jne.), eli nollakomponentin aiheuttamia [4].

Kolmansia yliaaltoja voidaan kumota tehokkaasti muuntajassa käyttämällä kolmiokytkentään [3], [4], [9]. Tämä kytkentätapa estää nollakomponenttien siirtymisen muuntajan läpi, sillä ne jäävät kiertämään muuntajassa käämien väliin. Kuvassa 5 vasemmalla kolmiokytkennässä käämien yli oleva jännite on;

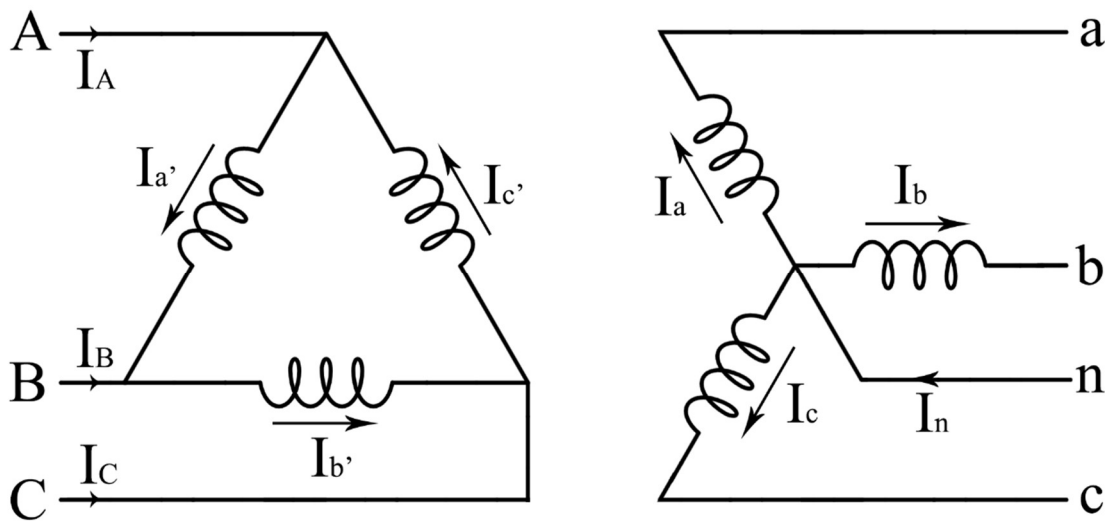
$$V_A + V_B + V_C = \sum_k 3V_{3k} \sin(3k\omega t + \theta_{3k}), k \in \mathbb{Z}^+ \quad (5)$$

sillä positiiviset ja negatiiviset komponentit kumoavat toisensa 120° vaihe-eron vuoksi. Tällöin kolmiokytkennässä vain kolmansien yliaaltojen virrat jäävät kiertämään kolmiota ympäri eivätkä siten siirry verkkoon muiden yliaaltojen tavoin.

Toinen muuntajan yleinen kytkentätapa on tähtikytkentä, joka on esitetty kuvassa 5 oikealla puolella. Tässä kytkentätavassa kolmansien yliaaltojen virrat eivät pääse kiertämään kuten kolmiokytkennässä, vaan ne siirtyvät ja summautuvat kytkennän neutraalipisteeseen. Tähtikytkennässä voidaan jättää neutraalijohdin kokonaan kytkemättä, jolloin vaiheiden välillä pääjännitteessä ei nähtäisi kolmansia yliaaltoja. Nämä kumoisivat toisensa, sillä kuvassa 5 tähtikytkennässä pääjännite on;

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad (6)$$

jolloin kolmannen yliaallon komponentit kumoutuvat, koska ne ovat samassa vaiheessa.



Kuva 5: Kolmio-tähtikytkentä.

Muuntajien kytkentätapaa merkitään kirjain-numeroyhdistelmillä, esimerkiksi Dd0, YNd1 ja Dyn11, joissa ensimmäinen isokirjain merkitsee ensiöpuolen kytkentätapaa ja toinen pienikirjain puolestaan toisiopuolen. Kirjainlyhenne D tai d tarkoittaa kolmiokytkentää (engl. delta-winding) ja Y tai y tähtikytkentää (engl. wye/star-winding). Kirjain N tai n kertoo, onko tähtikytkennän neutraalipiste maadoitettu. Numero lopussa ilmaisee ensiö- ja toisiopuolen vaihe-erosta. Luvulla 11 tarkoitetaan 30° asteen vaihe-eroa, jossa ensiöpuoli on toisiopuolta edellä. Tämä luku muodostuu siitä, kun täysi ympyrä, eli 360°, jaetaan kellotaululle 12 tunnin välille, jolloin saadaan 30° per tunti. Kolmio-tähtikytketyn muuntajan vaiheosoittimet siirtyvät kellotaulun mukaisesti ikään kuin tunnin taaksepäin osoittamaan kello 11, josta merkintätapa on saanut alkunsa.

Jakeluverkossa yleisin muuntajatyyppe on Dyn11, sillä sen kolmiokytkennän avulla saadaan eliminoidua hyvin verkon kolmannet yliaallot. Muuntajan toisiopuolella kuitenkin käytetään yleisesti tähtikytkentää, koska siihen saadaan kytkettyä maadoitusjohdin sen neutraalipisteeseen. Jakeluverkon puolella kuorma kytketään pääosin vaihejännitteisiin, jolloin tarvitaan verkkoon neutraalijohdin tämän toteuttamiseksi.

Muuntajia ajetaan toisinaan ylikuormassa, jolloin kuvan 4 mukaisesti siirrytään epäliikemagneettiselle alueelle. Tällaisessa tilanteessa syntyy origon suhteen symmetrinen magneetti-

soiva virta, joka synnyttää parittomia harmonisia yliaaltoja [4], [8], [10]. Näistä yliaalloista voidaan myös eliminoida kolmannet yliaallot kolmio-tähti-kytkennällä, jolloin jäljelle jää 5, 7, 11, 13 jne. kertaluvun harmoniset yliaallot.

Moottoreiden magnetisoitumisesta aiheutuu yhtä lailla yliaaltoja kuin muuntajista. Tämän lisäksi, moottoreissa yliaaltoja aiheuttaa epähomogeeninen magneettivuo ilmaväleissä.

2.2 Yliaaltoja tuottavat kuormat

Perinteisessä sähköjärjestelmässä sähköä tuotetaan voimalaitoksessa ja siirretään sähköverkon kautta asiakkaille. Sähkötehon suunta on tällaisessa järjestelmässä muuttumaton ja sähkönkulutus on asiakkaiden päässä melko ennustettavaa. Sähköverkko on nykyisin yhä monimuotoisempi ja sen karakteristiikka on muuttunut. Nykyverkossa sähkötehon siirron suunta voi vaihdella, jolloin asiakkaalta siirtyy tehoa sähköverkkoon. Sähköä voidaan nykyisin varastoida ja tuottaa itse, jolloin kulutuksen luonne poikkeaa paljon tavanomaisesta. Yhdistetyn sähköntuotannon ja teollisuuden kohteen kulutus voi olla hyvin epäsäännöllistä, joka hankaloittaa kulutuskäyttäytymisen ennustamista.

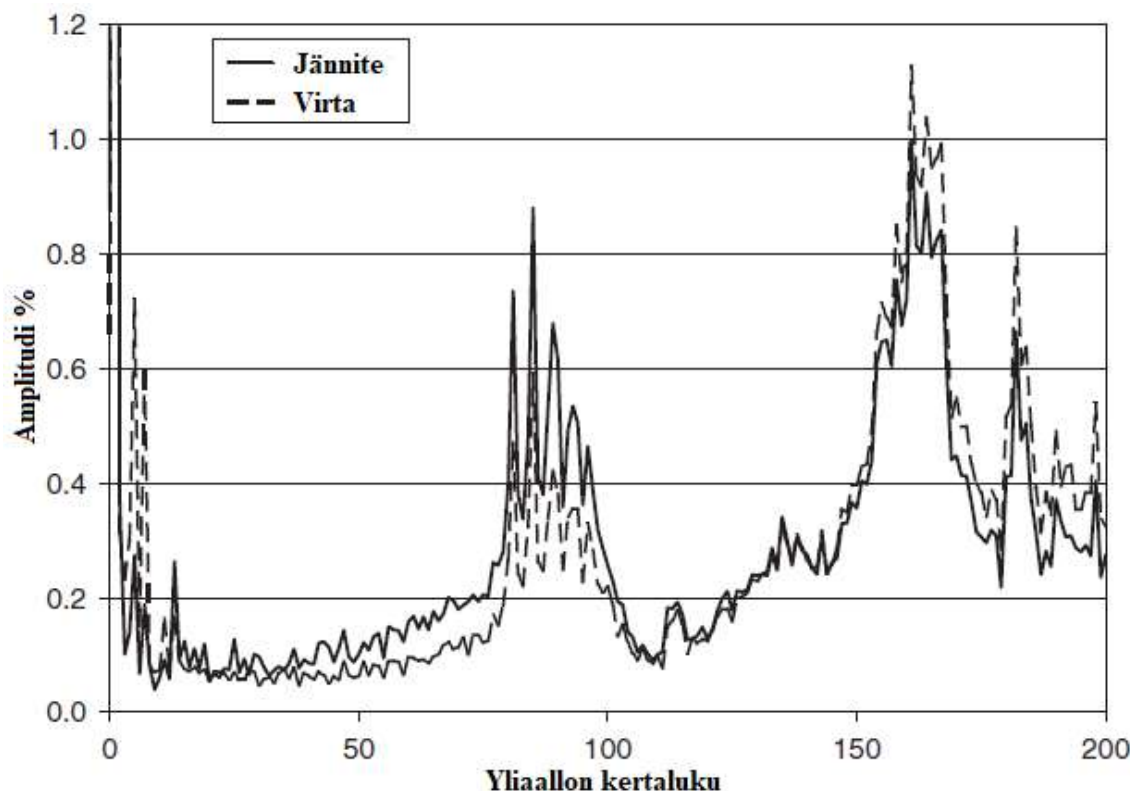
2.2.1 Paikallinen tuotanto

Paikallisella tuotannolla tarkoitetaan sähköverkossa yleisimmin aurinkopaneeleilla ja tuuliturbiineilla tuotettua sähköä. Tämä sähkö tuotetaan nimensä mukaan paikallisesti siellä, missä kulutus on. Erityisesti aurinkosähkön suosio on kasvanut viime aikoina. Sekä aurinko-, että tuulisähkö aiheuttaa verkkoon yliaaltoja. Nämä yliaallot ovat pääosin peräisin näiden laitteiden tehoelektroniikasta ja huonosti toteutettuna ne voivat olla haitaksi sähköverkolle [9], [11], [12].

Paikallisessa tuotannossa aiheutuvat yliaallot tulee rajoittaa hajautetun sähköntuotannon vaatimusten mukaan. Yliaaltovirran kokonaissärölle on asetettu hieman tiukempi raja hajautetulle tuotannolle kuin muulle tuotannolle, joka on 5 % [6]. Yksittäisille harmonisille yliaaltovirroille annetaan suositusrajat standardissa IEEE Std 519-2014 (kts. 3.2). Yksittäinen aurinkosähköjärjestelmä ei aiheuta verkkoon huomattavaa määrää yliaaltoja. Tilanne kuitenkin muuttuu, kun verkkoon kytketään lukuisia aurinkosähköjärjestelmiä, jolloin yliaaltojen muodostama teho nousee merkittäväksi osaksi verkon kokonaistehosta. Yliaaltojen teho, eli kokonaissärön kuljettama teho, on haitallista, kun sen määrä kasvaa korkeaksi suhteessa verkon tehoon. Verkolla on vaimentava vaikutus yliaaltoihin, jos kokonaissärön kuljettama teho ei ole kovin suuri.

Tuulisähköjärjestelmässä käytetään aurinkosähköjärjestelmän tapaan tehoelektroniikkaa [9], [13]. Tuulisähköjärjestelmässä turbiini pyörii tuulen voimakkuuden mukaan, jolloin myös tuotettu sähkö mukailee tuulta. Tästä johtuen tuulisähköjärjestelmiin täytyy kytkeä taajuusmuuttajia säilyttääkseen taajuus vakiona. Poikkeuksena on pysyvällä nopeudella toimivat tuuliturbiinit, joissa pyörimisnopeus pidetään vakiona käyttämällä ulkoista moottoria. Tämän tyyppiset tuulisähköjärjestelmät eivät tuota yliaaltoja, sillä ne eivät tarvitse tehoelektroniikkaa sähköntuotannon ohjaukseen kuten muut turbiinit [9]. Vaihtelevan nopeuden turbiinit käyttävät usein PWM-tekniikkaa ohjatessa sähköntuotantoa [9]. PWM (Pulse-Width Modulation) on menetelmä, jossa jännitettä säädetään katko-

malla syöttöä ohjatusti. Tällä menetelmällä saadaan tuotettua vähäisellä häviöllä vaihtojännite, mutta samalla syntyy yliaaltoja. Katkontataajuus PWM-laitteissa on 2–3 kHz [9], joka vastaa 50 Hz perustaajuisessa verkossa 40.–60. kertaluokan harmonisia yliaaltoja. Standardin SFS-EN 50160 [14] mukaan harmoniset yliaallot huomioidaan ainoastaan 40. kertalukuun asti. Tuulisähköjärjestelmien ei täten tarvitse seurata tarkasti tuottamia yliaaltoja, sillä ne tuottavat pääosin epäharmonisia yliaaltoja ja korkeamman kertaluvun harmonisia yliaaltoja kuin 40 [9]. Kuvassa 6 esitetään erään Intiassa sijaitsevan tuulivoimalan tuottamat yliaallot. Tuulivoimalan tuottamat yliaallot painottuvat selvästi suuremmille kertaluvuille kuin 40. Tämä kyseinen tuulivoimala oli kytketty 110 kV suurjänniteverkkoon eikä sen tuottamat yliaallot aiheuttanut mittauksien perusteella lähiverkkoon suurta häiriötä. Suurjännitejohtojen kapasitanssi suodattaa melko tehokkaasti korkeamman kertaluvun yliaaltoja, mikä nähtiin tämän mittauksen yhteydessä.



Kuva 6: Intiassa Radhapuramin tuulivoimalan tuottamat yliaallot. [9]

2.2.2 Sähköautot

Sähköautojen suosio on kasvussa ja niitä kytketään verkkoon yhä enemmän. Sähköenergia otetaan suoraan verkosta ja varastoidaan sähköautojen akkuihin. Verkosta otettu vaihtovirta täytyy muuntaa ennen latausta tasavirraksi tasasuuntaajalla ja tämä prosessi tuottaa yliaaltoja. Latauspisteet ottavat paljon tehoa verkosta, sillä akkujen latausaika riippuu tehon määrästä. Huonosti suunniteltu sähköautojen latausverkko voi aiheuttaa yliaaltopitoisuuden kasvamaan yli hyväksyttävien rajojen.

Yksittäinen sähköauton latauspiste ei aiheuta verkkoon liiallista haittaa, sillä laitevalmistajien täytyy pitää yliaaltojen määrä rajoissa. Tilanne kuitenkin muuttuu, kun verkkoon kytketään useita sähköautoja ja niiden ottaman tehon määrä on suuri verrattuna verkon kokonaistehoon. On huomattu, että sähköautojen ottaman tehon määrän kasvaessa yli 20 % muuntajan syöttämästä tehosta, verkon yliaaltopitoisuus voi nousta kohtuuttomiksi [15], [16], [17]. Erityisen tärkeää on, että saman muuntopiirin alle ei asenneta liiallista määrää sähköautojen latauspisteitä. Tilannetta hankaloittaa tämän lisäksi se, että sähköautoja ladataan paljolti samaan aikaan. Ihmiset lataavat autoaan mieluiten yöllä, kun sähkön hinta alhaisempi eikä autoa tarvita silloin. Tämä toisaalta tasoittaa verkon päiväsyklin kulutuskäyrää, mutta yliaaltojen kannalta se on huono asia. Verkossa on tällöin vähemmän muuta kuormaa, joka vaimentaisi yliaaltojen vaikutusta.

Toinen merkittävä tekijä yliaaltopitoisuuden nousuun on sähköautojen pikalaturit [17], [18]. Kuluttajan näkökulmassa sähköauto halutaan ladata mahdollisimman nopeasti, jonka pikalataus on mahdollistanut. Pikalaturi nostaa latauspisteen ottamaa tehoa verkosta, jolloin myös yliaaltojen tehon määrä kasvaa. Muuntopiirin lineaarisen kuorman suhteellinen määrä laskee nopeasti eikä verkko kykene enää vaimentamaan yliaaltoja. Lisäksi muuntajan kuormitus, varsinkin normaalisti pienen kulutuksen alueella, voi kohota yli nimellisarvon. Ylikuormitettu muuntaja tuottaa myös itsessään lisää yliaaltoja.

Suomessa vuoden 2017 lopussa sähköautoja oli liikennekäytössä 1449 kappaletta [19]. Näistä yli 70 % ovat joko Teslan tai Nissanin valmistamia sähköautoja. Molemmat valmistajat varustavat autot erillisillä asennettavilla latauspisteillä ja tarjoavat myös pikalatauspalveluita. Suomessa tuli vuonna 2016 voimaan uusi standardi (SFS-EN 62752), joka rajoittaa kotitalouksissa pistorasiasta ladattavien sähköautojen virran määrän 8 ampeeriin [20]. Tämä perusteltiin sillä, että pistorasioita ei ole suunniteltu pitkäaikaisesti siirtämään suuria virtoja. Sähköautoissa on suuret akut, joiden latausaika voi kasvaa kohtuuttoman pitkäksi alhaisilla latausvirroilla. Taulukossa 2 on esitetty lähteistä [21], [22] ja [23] saatujen akkukapasiteettien ja latauspisteiden tehojen mukaiset latausajat. Sähköautojen akut oletetaan ladattavan täydellä teholla tyhjästä täyteen ja pistorasiasta saatu teho on 1,84 kW, kun oletetaan jännitteeksi 230 V ja virta on rajoitettu 8 A.

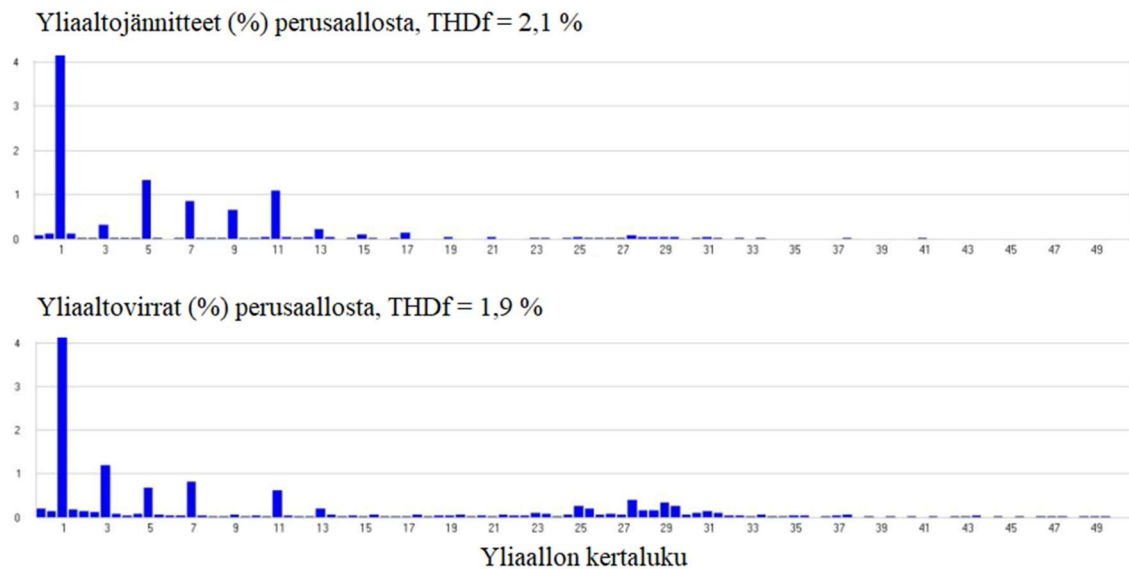
Taulukko 2: Suomen suosituimpien sähköautomallien akkukapasiteetit ja niiden latausajat eri latausajavaroilla.

Nissan Leaf	Akku (kWh)	Lataus-aika 1,84 kW pistorasiassa (h)	Latauspisteen teho (kW)	Lataus-aika (h)	Pikalatauspisteen teho (kW)	Lataus-aika (min)
2010–2017	24	13	6,6	3,6	50	29
	30	16	6,6	4,5	50	36
2018	40	22	6,6	6,1	50	48
Tesla						
Model S	75	41	11,5	6,5	120	38
	100	54	17,2	5,8	120	50

Helen Sähköverkko Oy toteutti vuonna 2017 laatumittaustutkimuksen sähköbussin latausaseman aiheuttamasta kuormituksesta verkkoon [24]. Sähköbussin akkukapasiteetti on 55 kWh ja sen suositeltu suurin latausteho on 350 kW [25]. Latausaseman liittymälle oli varattu 3x3x200A (414 kVA) pääsulakkeet. Tuloksissa ilmeni, että latauspiste aiheutti jonkin verran jännitteen alenemaa latausjaksojen aikana. Yliaaltoja latauspiste ei tuottanut merkittävää määrää. Kuvassa 7 on esitetty viikon mittaisen ajanjakson 10 minuutin mittausjakson keskiarvot virran suurimmille arvoille ja jännitteen kokonaissärön mittaus-tulokset. Tässä nähdään, että virtapiikkien aikana, jolloin sähköbussia ladattiin, ei esiinny huomattavan suuria kokonaissärön nousuja. Suurin virran arvo oli 524 A ja suurin jännitteen kokonaissärön arvo 2,7 %. Kuvassa 8 on esitetty vielä hetkelliset mitatut arvot jännitteen ja virran yliaalloille sähköbussin latauksen aikana. Arvot ovat suhteutettuna perusaaltoon.



Kuva 7: Sähköbussin latausaseman viikon mittaisen ajanjakson virran suurimmat arvot sekä jännitteen kokonaissärön suurimmat arvot vaihteittain. [24]



Kuva 8: Sähköbussin latausaseman mitatut hetkelliset yliaaltojännitteet ja yliaaltovirrat sekä niiden kokonaissärö verrattuna perusaaltoon latauksen aikana. [24]

Runsaasti sähköautoja sijaitsevilla alueella täytyy huomioda sähköautojen ottaman tehon suhteellinen määrä muuhun tehoon. Sähköautojen latauksen kuormaa tulisi siis ohjata kuten usein ohjataan esimerkiksi varaavan sähkölämmityksen kuormaa. Latauspisteiden tuottamat yliaallot kuitenkin osittain kumoavat toisiaan, kun verkkoon on kytketty useampi sähköauto [15], [16]. Tämä aiheutuu siitä, kun laturit kytketään verkkoon hieman eri aikaan toisistaan ja sähköautoissa myös akkujen alkuvaraukset eroavat [15]. Tällöin laturit ottavat virtaa verkosta hieman eri arvoilla, jolloin niiden tuottamat yliaallot eroavat hieman. Latauspisteet ovat järkevä sijoittaa tasaisesti verkon eri vaiheisiin, jotta verkkoon ei synny epätasaista kuormaa eikä yliaaltoja synny epätasaisesti vaiheiden välillä [26].

2.2.3 Sähkövarastot

Sähköntuotantomuodot ovat muuttuneet perinteisestä mallista, missä sähköntuotantolaitos tuottaa sähköä kuluttajien tarpeen mukaan. Tuuli- ja aurinkotuotanto ei ole ohjattavissa, joten sähköä tuotetaan näillä sen verran, mitä ympäristöstä saadaan sillä hetkellä. Tämä tuo epästabiilisuutta verkon tehotasapainoon, sillä enää pelkästään kuluttajan kuorma ei ohjaile sähköntuotannon tarvetta vaan myös itse sähköntuotanto. Tuuli- ja aurinkosähkö ovat tästä syystä hyvä osittain varastoida energiavarastoon. Energiavarastolla useimmiten tarkoitetaan akku moduuleista koostuvaa sähkövarastoa, mutta muita energiavarastomuotoja ovat esimerkiksi vetyvarastot ja vauhtipyörään perustuvat inertiaenergiavarastot.

Akku käyttöiset sähkövarastot ladataan kuten sähköautot, eli tuotettu tai verkosta otettu sähkö ensin tasasuunnataan ja sitten syötetään akkuihin. Yliaaltoja syntyy yhtä lailla tässä muuntoprosessissa kuten muissa epälineaarisissa kuormissa. Aurinkosähkölaite tuottaa tasavirtaa, joten niiden kytkeminen suoraan akkuun ei välttämättä vaadi muuntoprosessia. Kuitenkin akun kytkiessä verkkoon, vaihtosuuntaus on välttämätöntä. Verkkoon kytketään nykyisin paljon UPS- (Uninterruptible Power Supply) järjestelmiä,

eli katkeamattoman virransyötön- järjestelmiä. Nämä laitteet voivat toimia joko kaksimuunnostekniikalla tai yksimuunnostekniikalla [6]. Kaksimuunnostekniikalla muunnetaan ensin verkosta otettu virta tasavirraksi, jolla ladataan varavirtalähteet, ja uudelleen invertterillä vaihtovirraksi. Laitteen suhteellinen epälineaarisuus kasvaa tässä ja yliaaltojen määrä sen mukana.

2.3 Yliaaltojen vaikutukset

Yliaallot vaikuttavat laajasti eri verkon osiin eikä niitä tavallisesti haluta verkkoon. Ne vaikuttavat oleellisesti sähkönlaatuun, häviöihin ja verkkoon kytkettyjen laitteiden elinkaareen sekä toimivuuteen. Sähkönlaatu kärsii yliaaltojen vaikutuksesta ja se on yksi merkittävin syy, miksi yliaaltoja ei toivota verkkoon. Lisäksi yliaalloista koituu tehohäviöitä, jolloin verkon siirtämän tehon hyötysuhde laskee. Muut vaikutukset kohdistuvat moniin verkon eri komponentteihin ja verkkoon kytkettyihin laitteisiin, yleensä häviöiden ja elinkaaren lyhenemisen muodossa.

2.3.1 Verkon komponentit

Sähköverkko koostuu lukuisista laitteista ja komponenteista. Jakeluverkossa oleellimmat osat ovat muuntajat, maakaapelit sekä ilmajohdot. Yliaallot vaikuttavat haitallisesti kaikkiin näihin komponentteihin.

Yliaallot aiheuttavat muuntajissa ensisijaisesti ylimääräisiä häviöitä, joka ilmenee muuntajassa yleisimmin lämpönä [3]. Muuntajan häviöt koostuvat pääosin rautahäviöistä ja kuparihäviöistä. Rautahäviö, eli tyhjäkäyntihäviö, on hystereesihäviön ja pyörrevirtahäviöiden summa [27]. Yliaaltojännitteet lisäävät rautahäviöitä muuntajissa [3], [4], sillä rautahäviöt riippuvat vain muuntajan jännitteestä eikä kuormasta [27]. Muuntajan kuparihäviöt syntyvät sen käämityksissä. Kuparihäviöt lämmittävät huomattavasti muuntajaa, jonka vuoksi muuntajissa täytyy olla jäähdytysjärjestelmä. Yliaaltovirrat aiheuttavat muuntajan käämityksissä lisähäviöitä [3], [4], jotka lisäävät jäähdytystarvetta.

Sähkönjakeluverkko siirtää sähköä maakaapeleiden ja ilmajohtojen avulla. Yliaallot aiheuttavat sähkönsiirrossa lisää häviöitä. Virranahdo (engl. Skin Effect) on ilmiö, jossa kaapelissa tai johdossa kulkeva sähkövirta kulkee pääasiassa johtimen reunoilla ja johtimen keskellä sähkövirran osuus on hyvin pieni. Yliaallot kasvattavat virranahdoja johtimen reunoille, sillä virranahdo kasvaa taajuuden noustessa [3], [4]. Häviöt johtimessa voidaan määrittää kaavalla;

$$P_h = I^2 R \quad (7)$$

jossa huomataan, että häviöiden suuruus kasvaa virran neliössä. Virtatiheys johtimen reunoilla kasvaa virranahdon seurauksesta, jolloin myös johtimessa syntyneet häviöt kasvavat. Lisäksi johtimen efektiivinen kuormitettavuuskapasiteetti laskee, koska suurempi osa sähkövirrasta kulkee johtimen reunalla eikä hyödynnä johtimen koko paksuutta. Tällöin lämpöhäviöt ovat enemmän lokalisoituneet ja johdin lämpenee paikoin pienemmällä kuormalla.

Yliaallot lisäävät myös johtimissa esiintyvää korona ilmiötä [3], [4]. Korona tarkoittaa pientä sähköpurkausta johtimesta, jonka voi havainnoida rätisevänä äänenä ja salamoinnin kaltaisena valona. Koronassa johtimen ympäröivä materiaali ionisoituu ja muuttuu johtavaksi. Tällöin sähkö alkaa virrata ympäröivässä materiaalissa ja tästä koituu häviöitä. Korona saa alkunsa sitä suuremmalla todennäköisyydellä, mitä korkeampi johtimessa kulkevan sähkönn jännite on huipusta huippuun. Yliaallot aiheuttavat säröä verkon perustaajuuden päälle, joka kasvattaa jännitteen huippuarvoa. Koronan alkamisen todennäköisyys kasvaa siis yliaaltojen esiintymisen vuoksi. Tämä on erityisen tärkeää Suomen suurjänniteverkossa, sillä koronaa ilmenee pääosin suurjänniteilmajohdoissa, ja on huomattu, että kova pakkanen mahdollistaa helpommin koronan alkamisen.

2.3.2 Verkkoon kytketyt laitteet

Yliaallot vaikuttavat moniin verkkoon kytkettyihin laitteisiin. Suurin osa verkkoon kytketystä kuormasta koostuu erilaisista sähkömoottoreista, joiden toimintaan yliaallot vaikuttavat merkittävästi. Verkon suojalaitteet ja mittarit kokevat myös häiriötä yliaaltojen vaikutuksesta. Näiden lisäksi kuluttajien laitteet voivat kärsiä yliaalloista.

Moottorit kattavat maailman kokonaissähkökuormasta 43–46 % [28], joten on erityisen kannattavaa vähentää yliaalloista koituvaa haittaa moottoreihin. Moottoreita käytetään kaikenlaisissa laitteissa kuten pumppaamoissa, ilmastoinneissa, kompressoreissa ja pienemmissä laitteissa aina tietokoneen tuulettimiin asti. Kuten jo aiemmin todettiin, positiiviset harmoniset yliaallot aiheuttavat lisäkihtyvyyttä moottoreissa ja negatiiviset harmoniset yliaallot puolestaan jarruttavat moottoreita. Tämän lisäksi yliaallot yleisesti aiheuttavat lisälämpöhäviöitä moottorin eri osissa kuten käämityksissä [4]. Kokonaissärön noustessa moottoreissa yli 5 % suositusrajan, lisälämpöhäviöt alkavat olla erittäin haitallisia moottorin toiminnalle [3]. Muita yliaaltojen aiheuttamia haittavaikutuksia moottoreissa ovat häiriöt ohjattavuudessa ja induktiomootoreissa saatetaan havaita häiriöitä käynnistyksessä [4]. Yliaallot muuttavat moottorin nopeus-väntö-ominaisuuksia, jolloin ohjattavuus kärsii [4]. Induktio-mootoreissa yliaallot voivat aiheuttaa tilanteen, jossa yliaaltojen taajuus vastaa moottorin ilmapälien magneettikenttien resonanssitaajuuksia. Tällöin moottoriin syntyy vääntöä niin, että se ei lähde käyntiin.

Verkkoa suojataan ylivirroilta erilaisilla releillä, kytkimillä ja sulakkeilla. Kaikkien näiden laitteiden toiminta perustuu kykyyn havaita virhe virrassa ja katkaista virran kulku. Yliaallot voivat aiheuttaa virheellisiä laukeamisia suojalaitteissa, jolloin aiheutuu turhia sähkökatkoja. Releet ovat huomattu sietävän hyvin yliaaltojännitteitä, sillä niiden toimintaan ne eivät vaikuta oleellisesti alle 20 % yliaaltopitoisuuksilla [3]. Tämä pätee sähkömekaanisiin ja sähköisiin releihin, mutta uudempia digitaalisia releitä ei ole tutkittu kattavasti yliaaltopitoisessa ympäristössä [3]. Kytkimet ja sulakkeet katkaisevat virran kulun yleensä havaitessaan liiallisia lämpönousuja. Yliaallot nostavat virtapiikkien ja virranahdon kautta lämpöhäviöitä, jotka voivat aiheuttaa virheellisiä katkoja. Yliaallot aiheuttavat lisäksi ongelmia vikatilojen selvittämisessä. Verkkoon asennetut distanssireleet ovat määritetty verkon oletetulle impedanssille, mutta yliaallot vaikuttavat myös verkon impedanssiin. Tällöin vikojen paikallistaminen hankaloituu.

2.4 Resonanssit

Resonanssi on ilmiö, jossa järjestelmään syötetään värähtelyä järjestelmän ominaistajuudella. Tämä saa aikaan sen, että värähtely voimistuu ja hallitsemattomissa tapauksissa se voi vaurioittaa järjestelmän. Mekaanisessa järjestelmässä resonanssi aiheuttaa kappaleen fyysistä värähtelyä, joka voi olla tarkoituksellista. Kielisoittimissa hyödynnetään resonanssia tuottamaan ääntä, mutta useissa järjestelmissä resonanssi voi syntyä tahtomasti. Tästä ääriesimerkki on Yhdysvalloissa romahtanut silta, Tacoma Narrows Bridge, joka alkoi resonoimaan tuulen vaikutuksesta hallitsemattomasti. Resonanssia esiintyy myös sähkötekniillisissä laitteissa. Tämä syntyy silloin, kun järjestelmän kapasitiivinen reaktanssi vastaa sen induktiivista reaktanssia, ja järjestelmässä on tämän taajuuden komponentti. Resonanssitaajuuden voi tällöin laskea kaavalla;

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

jossa L on verkon induktanssi ja C kapasitanssi. Kuten mekaanisissa laitteissa, sähköisissä laitteissa hyödynnetään resonanssia voimistamaan signaaleja. Resonanssia voi kuitenkin syntyä tahattomasti ja arvaamattomasti, sillä sähköiset järjestelmät ovat usein monimutkaisia. Tällöin koituu lisälämpöhäviöitä, joka lyhentää verkon komponenttien elinikää. Lisäksi yliaaltojännitteet ja -virrat moninkertaistuvat, jolloin laitteet voivat ylikuormittua ja vaurioitua.

Sähköverkossa käytetään kondensaattoreita korjaamaan verkon tehokerrointa. Tehokerroin kertoo verkon pätötehon suhteesta näennäistehoon. Loistehon kasvaessa, tehokerroin laskee, joka ei ole sähkönsiirron kannalta haluttua. Verkon siirtokyky mitoitetaan näennäistehoon, mutta kuormaan siirretty teho mitataan pätötehoon. Kondensaattoreita käytetään verkossa yleisesti kompensoimaan induktiivista loistehoa, jolloin tehokerroin paranee. Rinnakkaiskompensointi aiheuttaa verkossa resonanssitaajuuden kaavan 9 mukaan;

$$f_R = f \sqrt{\frac{S_{SC}}{Q_C}} \quad (9)$$

jossa f on verkon perustaajuus, S_{SC} on verkon oikosulkuteho ja Q_C on kompensointikondensaattorin loisteho [3], [6], [10].

Verkon vahvuus vaikuttaa oleellisesti haitallisen resonanssin esiintyvyyteen. Alhaisemman kertaluvun harmoniset yliaallot aiheuttavat ensisijaisesti ongelmia, sillä niiden yliaaltojännitteet ja -virrat ovat normaalisti suurempia kuin korkeamman kertaluvun harmoniset yliaallot. Heikossa verkossa, kun kaavassa 9 S_{SC} on pieni, resonanssitaajuus laskee. Vastaavasti suuren kompensoinnin vaativa verkko, jossa Q_C on suuri, alentaa myös resonanssitaajuutta.

Verkossa esiintyy myös sarjaresonanssia. Tämä ilmenee yleisimmin kompensointikondensaattorin ja syöttävän verkon muuntajan välissä [10]. Sarjaresonanssi ei ole kuitenkaan yhtä vakava kuin rinnakkaisresonanssi, sillä toisin kuin rinnakkaisresonanssi, sarjaresonanssi absorboi resonanssitaajuuden yliaallon [10]. Sarjaresonanssia voidaan hyödyntää tästä syystä yliaaltojen suodattamisessa.

Resonanssien esiintymistä verkossa on erittäin vaikea ennustaa, sillä verkon komponentit, loisteho, verkon vahvuus ja verkon yliaaltopitoisuus vaikuttavat kaikki resonanssien syntymiseen. Korkeamman kertaluvun yliaallot voivat aiheuttaa arvaamattomia resonanssitilanteita, jonka vuoksi niitä on erittäin vaikea hallinnoida. Kompensoimattomassa verkossa voi myös ilmentyä resonanssia. Kuten aiemmin todettiin, maakaapelointi tuottaa kapasitiivista loisvirtaa, joka voi muodostaa yhdessä yliaaltojen ja verkon induktanssin kanssa resonanssitilanteita. Resonanssien välttämiseksi tulee selvittää verkon yliaaltopitoisuus ja käytettävät kompensointitehot sekä kaapeloinnin vaikutukset.

2.5 Yliaaltojen suodattaminen

Yliaaltojen vähentämiseksi verkossa käytetään erilaisia suodattimia. Nämä voidaan jakaa passiivi- ja aktiivisuodattimiin. Suodattaminen kannattaa yleensä suorittaa lähellä yliaaltolähdettä, jolloin yliaaltojen vaikutus verkkoon jää vähäiseksi.

Passiivisuodattimet ovat yksinkertaisia piirejä, jotka käyttävät passiivisia komponentteja kuten kondensaattoreita, käämejä ja resistansseja. Ne toimivat sarjaresonanssin avulla, jolloin tietyn taajuuden harmoniset yliaallot saadaan suodatettua. Piiri absorboi taajuuksia tehokkaasti, mutta rajoittuu esiasetettuihin taajuuksiin. Passiivisuodattimia on kahdenlaisia: tietyille taajuuksille viritetyt suodattimet ja laajalle kaistalle viritetyt suodattimet [10], [29]. Passiivisuodattimen voi asettaa suodattamaan 1–3 taajuutta kerrallaan, jos halutaan suodattaa enempi määrä taajuuksia, on kannattavaa käyttää laajakaistasuodatinta [10]. Laajakaistasuodatin asetetaan yleensä suodattamaan kaikki perustaajuutta suuremmat taajuudet. Sitä ei ole järkevä asettaa suodattamaan pienen kertaluvun yliaaltoja, sillä laajakaistasuodatin saattaa silloin suodattaa osittain perustaajuutta. Laajakaistasuodatinta käytetään usein yhdessä taajuuskohtaisten suodattimien kanssa, jolloin taajuuskohtaiset suodattimet laitetaan suodattamaan pieniä taajuuksia (esim. väliltä 250–550 Hz) ja suuremmat taajuudet suodatetaan laajakaistasuodattimella [10]. Passiivisuodattimet ovat yksinkertaisia, helppoja ja halpoja ratkaisuja yliaaltojen suodattamiseksi. Ne ovat kuitenkin hyvin rajoittuneita. Passiivisuodattimen käyttö täytyy suunnitella aina tapauskohtaisesti ja sen toiminta on riippuvainen verkon impedanssista. Näitä on hyvä käyttää kohteissa, joissa yliaaltopäästöt ovat entuudestaan tiedossa ja niiden sisäisen verkon impedanssi on muuttumaton.

Aktiivisuodattimet tarkastelevat verkon yliaaltoja ja kompensoivat niitä syöttämällä verkkoon takaisin samoja yliaaltoja, mutta niiden vaihe käännettynä 180° [6], [10], [13], [29], [30]. Tällöin yliaallot kumoavat toisensa ja verkkoon jää puhtaampi perustaajuuden signaali. Aktiivisuodatin voi täten eliminoida yliaaltoja hyvin laajalla skaalalla, eikä verkon muuttuva impedanssi vaikuta suodattimen toimintaan kuten passiivisuodattimessa. Ne kompensoivat harmonisten yliaaltojen lisäksi epäharmonisia, joita passiivisuodatus ei pysty suodattamaan [6]. Aktiivisuodatus on kuitenkin kalliimpi vaihtoehto verrattuna passiivisuodatukseen, sekä siitä koituu paljon häviöitä [10]. Muuttuvassa verkossa verkko-yhtiön näkökulmassa aktiivisuodatus on kuitenkin kannattavampi suodatusvaihtoehto kuin passiivinen, sillä verkon impedanssi on vaihteleva, jolloin passiivisuodattimia täytyisi jatkuvasti asentaa uusilla asetuksilla.

3 Sähkönlaatu

Suomen sähköverkossa syötetylle sähkölle on määritetty tarkat arvot, joiden rajoissa sähkönlaadun täytyy pysyä. Sähkönlaadun kattaa yleisesti sähköverkon jännite ja taajuus. Standardissa SFS-EN 50160 [14] määritellään pienjänniteverkossa vaihejännitteelle arvo $U_v = 230 \text{ V}$, joka määritellään vaiheen ja nollan välissä, sekä pääjännitteelle $U_p = \sqrt{3} \cdot U_v = 400 \text{ V}$, joka määritellään vaiheiden välissä. Taajuudelle standardi määrittää arvon $f = 50 \text{ Hz}$. Verkossa jännitteen vaihtelu saa olla enintään $\pm 10 \%$ nimellisarvosta. Kuitenkin erityisillä haja-alueilla verkon jännitteen arvo saa vaihdella $+10 \%$ ja -15% välillä. Tällaisessa tilanteesta verkon käyttäjiä tulee tiedottaa asiasta. Verkon taajuudelle määritellään vastaavasti taulukon 3 mukaiset raja-arvot.

Taulukko 3: Verkkotaajuuden sallittu vaihtelevuus 50 Hz perustaajuudesta. Erillisverkolla tarkoitetaan pääverkosta irtautunutta käyttöaluetta, esimerkiksi syrjäseutu tai saari. [14]

Yhteiskäyttöverkoissa		
50 Hz $\pm 1 \%$	eli 49,5–50,5 Hz	99,5 % vuodesta
50 Hz $+4 \%$ / -6%	eli 47,0–52,0 Hz	100 % ajasta
Erillisverkoissa		
50 Hz $\pm 2 \%$	eli 49,0–51,0 Hz	95 % viikosta
50 Hz $\pm 15 \%$	eli 42,5–57,5 Hz	100 % ajasta

3.1 Harmoniset yliaaltojännitteet

Standardissa SFS-EN 50160 määritellään rajat jokaiselle yksittäiselle kertaluvun harmoniselle yliaaltojännitteelle. Taulukossa 4 on esitetty nämä rajat suhteessa verkon nimellisjännitteeseen. Arvot ovat määritelty siten, että jokaisen viikon mittaisen ajanjakson aikana 95 % jokaisesta kertaluvun harmonisesta yliaaltojännitteestä tulee olla taulukon 4 antamien rajojen sisällä. Harmonisten yliaaltojännitteiden mittaus otetaan 10 minuutin aikaväliltä, jolloin määritellään sen ajan keskimääräinen tehollisarvo jokaiselle harmoniselle komponentille. Näistä komponenteista, eli harmonisista kertaluvuista, määritellään jakelujännitteen kokonaissärökerroin THD. Kokonaissärökertoimen tulee olla 8 % rajan sisällä, jossa huomioidaan harmoniset yliaaltojännitteet aina 40. kertalukuun asti. Taulukossa 4 on määritelty ainoastaan 25. kertalukuun asti, sillä korkeamman kertaluvun harmoniset yliaallot ovat yleensä ottaen arvoltaan pieniä ja niille on hankala määrittää rajoja mahdollisten resonanssien vuoksi.

Taulukko 4: Standardissa SFS-EN 50160 määritetyt harmonisten yliaaltojännitteiden rajat suhteutettuna nimellisjännitteeseen pien- ja keskijänniteverkossa. [14]

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Kerta-luku	Suhteellinen jännite	Kerta-luku	Suhteellinen jännite	Kertaluku	Suhteellinen jännite
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6–24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Vastaavat arvot määritellään standardissa myös keskijänniteverkossa, jossa ainoana erona on verkon jännite, joka on määritelty keskijänniteverkossa 1–36 kV. Suurjänniteverkossa ei ole määritelty jännitteen vaihtelulle rajoja, sillä suurjänniteasiakkaita on harvassa ja heillä on hyvin yksilölliset sähköntarpeet. Taajuuden vaihtelevuudelle on kuitenkin voimassa samat rajat kuin pien- ja keskijänniteverkoissa. Yliaalloille suurjänniteverkossa annetaan hieman tiukemmat rajat kuin muissa jännitetasoverkoissa. Suurjänniteverkossa harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut rajat ovat kuitenkin vielä osittain harkittavana, eikä suurjänniteverkossa ole määritelty nimellisjännitteelle suurinta sallittua kokonaissärökerrointa. Taulukossa 5 on koottuna suurjänniteverkossa sallitut rajat harmonisille yliaaltojännitteille suhteutettuna nimellisjännitteeseen, joka on määritelty suurjänniteverkossa 36–150 kV.

Taulukko 5: Standardissa SFS-EN 50160 määritetyt harmonisten yliaaltojännitteiden rajat suhteutettuna nimellisjännitteeseen suurjänniteverkossa. [14]

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Kerta-luku	Suhteellinen jännite	Kerta-luku	Suhteellinen jännite	Kerta-luku	Suhteellinen jännite
5	5,0 %	3	3,0 %	2	1,9 %
7	4,0 %	9	1,3 %	4	1,0 %
11	3,0 %	15	0,5 %	6–24	0,5 %
13	2,5 %	21	0,5 %		
17	harkittavana				
19	harkittavana				
23	harkittavana				
25	harkittavana				

Harmonisten yliaaltojännitteiden esiintyminen verkossa täytyy pitää edellä mainittujen rajojen sisällä. Huonon sähkönlaadun toimittaminen kuluttajille voi aiheuttaa vahinkoja kuluttajien laitteissa. Näissä tilanteissa, sähköverkkoyhtiö on vastuussa laitteiden rikkoutumisesta, jos standardin mukaisia sähkönlaatuun koskevia rajoja ei ole noudatettu ja sähkönlaadun ongelmat ovat peräisin verkon puolelta. On siis verkkoyhtiön eduksi valvoa verkon sähkönlaatua, asiakastyytyväisyyden sekä korvausvaatimusten vuoksi.

3.2 Harmoniset yliaaltovirrat

Suomessa käytetyssä sähkönlaadun standardissa ei määritetä rajoja harmonisille yliaaltovirroille. Tämä osittain siksi, että jakeluverkossa on määritetty vakio jännite, jolloin kulkevan virran suuruus määräytyy kuorman suuruudesta. Sähköverkkoyhtiö voi vaikuttaa verkon jännitteeseen, mutta kuorman suuruutta verkkoyhtiö ei voi hallita. Kuormasta peräisin olevat harmoniset yliaaltovirrat aiheuttavat kuitenkin yhdessä verkon impedanssin kanssa harmonisia yliaaltojännitteitä, jolloin sähkönlaatu kärsii. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) antaa suositusrajat sähköverkkoon syötetyille harmonisille yliaaltovirroille. Ne ovat määritelty heidän standardissa IEEE Std 519-2014 [31].

Rajojen määrittely yliaaltovirroille poikkeaa yliaaltojännitteistä. Ensinäkin, yliaaltovirta määritellään suhteutettuna kuormavirtaan, eikä verkon perusarvoon. Toiseksi, yliaaltovirtojen määrä mitataan sähkönkuluttajan lähimmästä yhtymästä verkkoon, missä verkko haarautuu muille kuluttajille. Yliaaltojännitteet puolestaan mitataan kuluttajan päädyssä. Kolmanneksi, yliaaltovirroille määritellään eri rajat, riippuen kuorman suuruudesta. Yliaaltovirran mittauspisteen, eli lähimmästä yhtymäkohdassa, oikosulkuvirta I_{SC} suhteutetaan kuormavirtaan I_L . Suuremille kuormille asetetaan tiukemmat rajat yliaaltovirroille, sillä niillä on suhteessa suurempi vaikutus verkkoon kuin pienemmillä kuormilla [32]. Lopuksi, yliaaltovirtoja ei yleensä analysoida kokonaissärön THD:n avulla, sillä se saattaa antaa harhaanjohtavia arvoja. Pienellä virralla toimiva laite ei välttämättä aiheuta verkkoon paljon häiriötä, vaikka sen kokonaissärö olisikin suuri. [33] Yliaaltovirtoja analysoidaan usein kokonaiskuormansärön (TDD: Total Demand Distortion) avulla. Tämä määritellään kaavalla;

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_2^n I_n^2}}{I_L} \quad (10)$$

jossa I_n on indeksin n kertaluvun harmonisen yliaaltovirran tehollisarvo ja I_L on kuormavirran tehollisarvo.

Standardissa Std 519 annetaan eri suositusrajat harmonisille yliaaltovirroille, riippuen jännitetasosta ja kuormavirran suuruudesta. Jännitetasot jaetaan standardissa kolmeen osaan: 0,12–69 kV, 69–161 kV ja yli 161 kV jännitteet. Taulukoissa 6, 7 ja 8 esitetään suositusrajat harmonisille yliaaltovirroille eri jännitetasoissa. Yliaaltovirrat mitataan kahdella eri aikavälillä. Ensimmäinen aikaväli on 3 sekuntia ja toinen 10 minuuttia, joita kutsutaan erittäin lyhyeksi ja lyhyeksi mittaukseksi. Annetut rajat suhteutetaan mittausaikaväliin seuraavasti:

- Erittäin lyhyen aikavälin mitatun harmonisen yliaaltovirran tulee olla 2,0 kertaa taulukoiden 6, 7, ja 8 antaman rajan sisällä 99 % päivästä.
- Lyhyen aikavälin mitatun harmonisen yliaaltovirran tulee olla 1,5 kertaa taulukoiden 6, 7, ja 8 antaman rajan sisällä 99 % viikosta.
- Lyhyen aikavälin mitatun harmonisen yliaaltovirran tulee olla 1,0 kertaa taulukoiden 6, 7, ja 8 antaman rajan sisällä 95 % viikosta.

Taulukko 6: Jännitetaso 0,12–69 kV rajat harmonisille yliaaltovirroille. Parillisten kertaluvun yliaaltovirtojen raja on 0,25 kertaa taulukon antama arvo. [31]

Kuormavirtaan I_L suhteutetut sallitut rajat prosentteina						
Harmonisen kertaluvun n parittomat yliaaltovirrat						
I_{SC}/I_L	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n < 50$	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
≥ 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Taulukko 7: Jännitetaso 69–161 kV rajat harmonisille yliaaltovirroille. Parillisten kertaluvun yliaaltovirtojen raja on 0,25 kertaa taulukon antama arvo. [31]

Kuormavirtaan I_L suhteutetut sallitut rajat prosentteina						
Harmonisen kertaluvun n parittomat yliaaltovirrat						
I_{SC}/I_L	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n < 50$	TDD
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50<100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100<1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
≥ 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

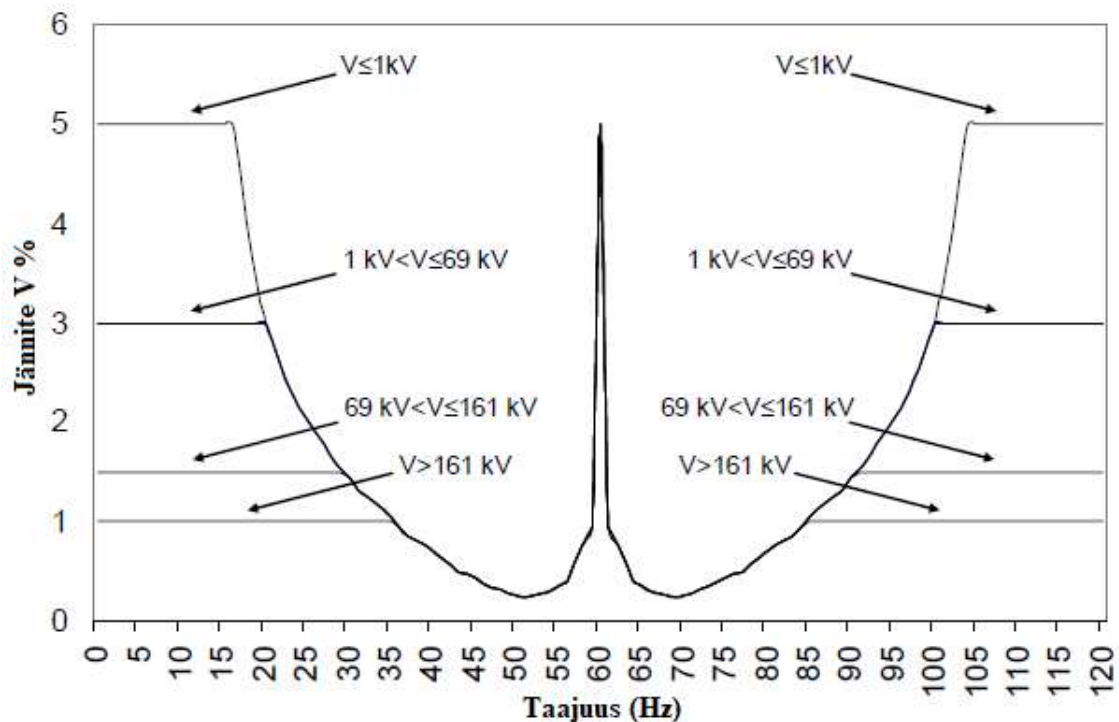
Taulukko 8: Korkeamman kuin jännitetaso 161 kV rajat harmonisille yliaaltovirroille. Parillisten kertaluvun yliaaltovirtojen raja on 0,25 kertaa taulukon antama arvo. [31]

Kuormavirtaan I_L suhteutetut sallitut rajat prosentteina						
Harmonisen kertaluvun n parittomat yliaaltovirrat						
I_{SC}/I_L	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n < 50$	TDD
<25	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
25<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

3.3 Epäharmoniset yliaallot

Suomen käyttämässä standardissa SFS-EN 50160 ei määritellä rajoja epäharmonisille yliaalloille. Epäharmonisten yliaaltojen vaikutus sähköverkkoon ei ole niin mittava, että niille olisi tarvetta määrittää rajoja. Verkolla on vaimentava vaikutus epäharmonisiin yliaaltoihin. Verkkoon kuitenkin kytketään kasvavalla määrällä epälineaarista kuormaa, ja niiden aiheuttamille epäharmonisille yliaalloille on harkinnassa rajojen asettamista pien- ja keskijänniteverkoissa. Suurjänniteverkossa epäharmonisille yliaalloille ei ole annettu rajoja, sillä suurjänniteverkon resonanssitaajuudet ovat alhaisia. Tämä johtuu siitä, että kompensoinnissa käytetään suuria kapasitansseja sekä induktansseja, jolloin resonanssitaajuudet ovat matalia, luokkaa 200–500 Hz [14].

Epäharmoniset yliaaltojännitteet voivat aiheuttaa välkyntää, jos taajuus lähestyy verkon perustaajuutta. Välkynnällä tarkoitetaan verkossa tapahtuvaa jännitteen nopeaa vaihtelua, joka voi aiheuttaa esimerkiksi lamputta valon intensiteetin muuttumista. Standardissa SFS-EN 50160 määritellään välkynnälle, että viikon mittaisella ajanjaksolla välkynnän pitkäaikainen häiritsevyysindeksi tulee olla $P_{It} \leq 1$ vähintään 95 % ajasta. Häiritsevyys indeksin ollessa 1, välkyntää voidaan ajatella häiritseväksi. IEEE:n standardi Std 519-2014 antaa rajat epäharmonisille yliaaltojännitteille perustuen niiden tuottamaan välkyntään. Kuvassa 9 nähdään nämä rajat jännitteen suhteelliselle vaihtelevuudelle perustaajuudesta. Rajat ovat määritelty 60 Hz taajuiselle verkolle, mutta samankaltaiset rajoitteet pätevät myös 50 Hz verkossa.



Kuva 9: Standardin Std 519-2014 antamat suositusrajat epäharmonisille yliaaltojännitteille 60 Hz perustaajuisessa järjestelmässä. [31]

4 Mittausmenetelmät

Yliaaltoja mittaavia laitteita on paljon markkinoilla, joissa on eroavaisuuksia mittaustarkkuuksissa sekä mitattavien muuttujien määrässä. Mittalaitetta valitessa on hyvä määritellä halutun tuloksen tarkkuusluokka, sillä mittausdataa voi kertyä muuten tavattoman paljon. Sama pätee mitattavien muuttujien valinnassa, jossa yliaalloille tarpeettomat muuttujat kannattaa jättää mittaamatta. Useat mittalaitteet turvautuvat yliaaltoja mitatessa standardien määrittelemiin raja-arvoihin, sillä sähkönlaadun kannalta ei tarvitse mitata tarkemmin. Tämä toimii hyvin sähkönlaadun varmistamisessa, mutta tarkempaa kuvaa tutkimusmielessä yliaalloista ei saada mitattua. Tällöin täytyy turvautua hyvin tarkkoihin ja monipuolisiin erikoismittareihin.

4.1 Laatumittaukset

Carunalla on käytössä MX Electrix Oy valmistamia eQL laatumittauslaitteita. Vanhemmat mittaukset ovat suoritettu eQL Laatuvahti EDFmodGSM -moduulilla ja uudemmat mittaukset päivitetyllä eQL Laatuvahti2 -mittarilla. Molemmat mittarit seuraavat verkon jännitetasoa vaiheittain, välkyntää, jännitekuoppia, vaiheiden kokonaissäröä, epäsymmetriaa ja taajuutta. Laatuvahti2 mittaa näiden lisäksi jännitteen tasakomponenttia, jännitteen harmonisia yliaaltoja (kertaluvut 3, 5, 7), vaihevirrat ja tehokertoimet vaiheittain. Lisäksi Laatuvahti2 kykenee mittaamaan myös keskijänniteverkkoa. Vanhempi laatuvahti lähettää mittaustiedot GSM/GPRS yhteyksillä ja uudempi laatuvahti2 käyttää puolestaan 3G/Ethernet (TCP/IP) yhteyksiä. Molemmissa laatuvahteissa tiedot saadaan tallennettua PQNetin raportointipalveluun, joka on Carunalla käytössä.

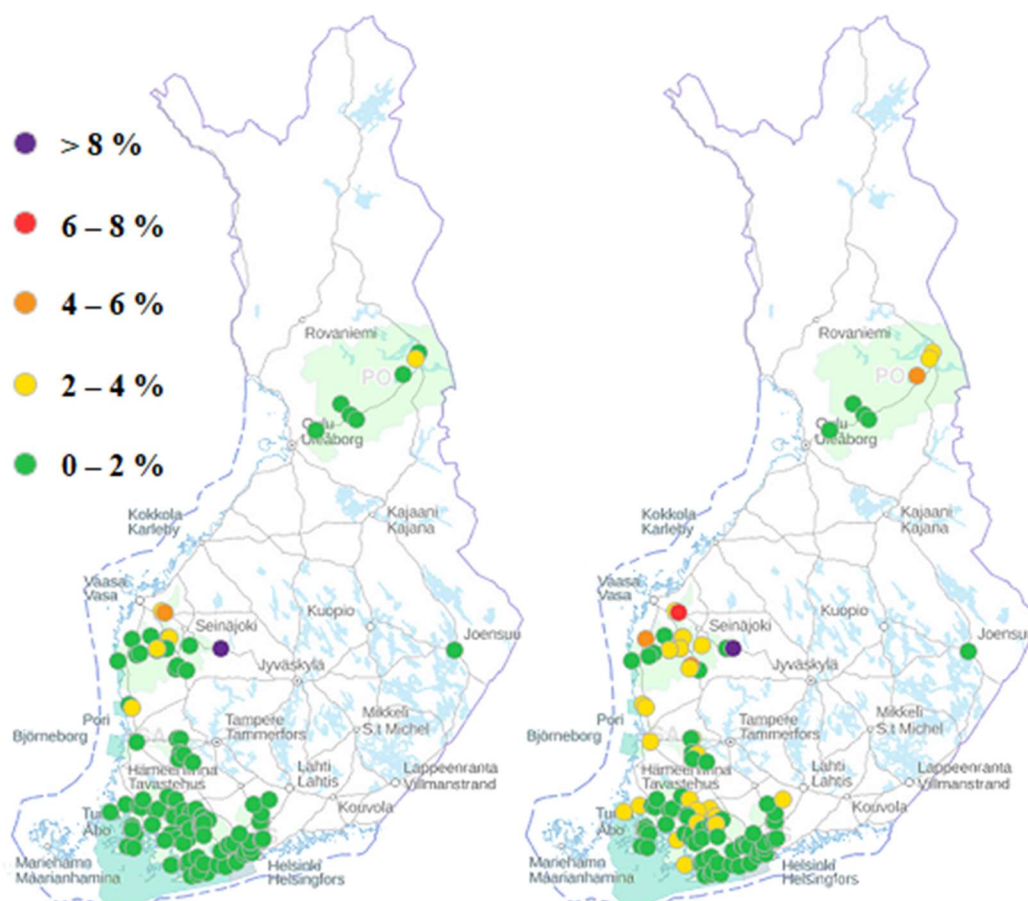
4.2 Erikoismittaukset

Tätä työtä tehdessä saatiin käyttöön erikoismittarin, jolla saa mitattua laajemmin yliaaltoja. Mittarin valmistaa a-eberle, jonka tuotteista käytettiin mallia PQ-Box 300. Tämä mittari voidaan asettaa tallentamaan mittauksia jopa 200 ms välein. PQ-Box 300 mittaa monia muuttujia, mutta tämän työn kannalta tärkeimmät ominaisuudet ovat jännite-, virta- ja tehomittauksien lisäksi laajat yliaaltomittaukset. Mittarilla saadaan harmoniset jännitteen ja virran yliaallot 50. kertalukuun asti. Korkeampia yliaaltojännitteitä saadaan 2–9 kHz taajuuksilla käyttämällä 200 Hz kaistanleveyttä ja 8–170 kHz käyttämällä 2 kHz kaistanleveyttä. Yliaaltovirtoja saadaan 2–9 kHz taajuuksilla 200 Hz kaistanleveydellä. Mittaustulokset voidaan kerätä mittalaitteesta langattomasti WLANin avulla tai Ethernet-kaapelilla. Mittalaitteessa on myös sisäinen muisti, josta mittaustulokset voi ladata myöhemmin. Tuloksia käsitellään a-eberlen omalla WinPQMobil-analysointiohjelmalla.

5 Yliaallot Carunan verkossa

Carunan verkossa on suoritettu laatumittauksia ympäri verkkoaluetta. Laatumittaukset ovat tehty usein asiakkaan pyynnöstä sähkönlaadun seurannan tai verkkoyhtiön oman kiinnostuksen vuoksi. Nämä mittaustulokset ovat säilytetty ja niitä voidaan hyödyntää verkon yliaaltopitoisuuden havainnollistamiseksi.

Seuraavassa osiossa tarkastellaan vuosina 2012–2017 tehtyjä laatumittauksia. Näitä on yhteensä 125, joista 9 on uudelleen mittauksia samasta kohteesta. Mitattuja kohteita on siis 116. Tämä on pieni otos Carunan verkosta, sillä verkkoon on kytkettynä yhteensä noin 670000 kohdetta. Otoksesta nähdään kuitenkin suuntaa antava tilanne, millä tasolla yliaaltopitoisuudet ovat. Mittausajanjaksot vaihtelevat viikosta muutamaan vuoteen ja kaikki mittaustulokset ovat 10 minuutin keskiarvolukemia. Tiedot ovat tuotu Excel-taulukkoon, joissa tuloksia on analysoitu. Osasta mittauksista on jouduttu mitätöimään yksittäisiä arvoja, sillä ne ovat olleet virheellisiä mittauksia. Virheelliset mittaukset tunnistavat epämääräisistä arvoista jännitteelle ja virralle, sekä yliaaltokomponenttien ollessa 99 %. Mittaustuloksista määriteltiin koko mittausajan keskiarvollinen ja suurin mitattu arvo jännitteen kokonaissärölle. Kuvassa 10 nähdään mitatut tulokset kokonaissärölle merkittynä mittauspaikan sijaintiin kartalla ja taulukossa 9 kaikkien mittauskohteiden keskiarvostetut tulokset.



Kuva 10: Laatumittauksien tulokset jännitteen kokonaissärölle. Vasemmalla koko mittausajan keskiarvolliset tulokset ja oikealla koko mittausajan suurimmat mitatut arvot.

Taulukko 9: Laatumittauksien keskiarvolliset tulokset kokonaissärölle ja harmonisille yliaalloille. Kaikki tulokset ovat esitetty prosentteina suhteessa perusjännitteeseen.

Jännitteen vaihe	L1	L2	L3
THD	0,81	0,69	0,80
THD suurin arvo	1,86	1,82	1,87
3. yliaalto	0,11	0,12	0,11
5. yliaalto	0,24	0,25	0,23
7. yliaalto	0,18	0,17	0,19
3. yliaalto suurin arvo	0,42	0,42	0,41
5. yliaalto suurin arvo	0,85	0,89	0,81
7. yliaalto suurin arvo	0,55	0,59	0,58

Laatumittauksien tuloksista huomataan, että yliaaltopitoisuudet ovat keskiarvollisesti matalalla muutamaa kohdetta lukuun ottamatta. Kohteet, joissa jännitteen kokonaissärön keskiarvo ylittää 2 %, ovat sähköntuotantolaitoksia, pumppaamoita tai teollisuuslaitoksia. Kahdessa pienemmässä kohteessa kokonaissärön lukemat ylittivät myös 2 % rajan. Näistä ensimmäinen on maatalouskohde, jossa on luultavasti yliaaltoja aiheuttavia suuria laitteita. Kohteessa hetkellinen virta ylitti useaan otteeseen liittymisoikeuden ja yliaaltojen tuotto oli hyvin jaksottaista. Toinen kohde on pientalous, jossa kulutus ei luultavasti tuota mitattuja yliaaltoja. Tämän kohteen muuntopiirissä ei ole muitakaan suurempia kuluttajia, joista yliaaltojen luulisi olevan lähtöisin. Todennäköisesti yliaaltojen lähde on keskijännitepuolen kuormasta. Mitatuista yliaaltokomponenteista kolmas harmoninen yliaalto oli selvästi pienempi kuin viides tai seitsemäs harmoninen yliaalto. Tämä viittaisi siihen, että yliaallot voivat tulla muuntajan läpi keskijännitepuolelta. Kohteen lähistöllä sijaitsee tuulivoimala, joka on reilu kilometrin päässä kohteesta. Tuulivoimala saattaa osaksi aiheuttaa korkeat yliaaltopitoisuudet, mutta varmuudella sitä ei voi sanoa.

Keskiarvostetut tulokset eivät välttämättä kerro yliaaltopitoisuuksien todellista määrää, sillä useassa kohteessa yliaaltojen määrä riippuu voimakkaasti kulutuksesta. Teollisuuskohteissa yliaaltopäästöt ovat huomattavasti suurempia arkisin päiväaikaan kuin muina aikoina. Tuotantokohteissa, kuten tuulivoimaloissa, puolestaan yliaaltojen määrä vaihtelee paljon tuotantokyvyn mukaan. Yliaaltopitoisuuden havainnollistamiseksi on hyvä tarkastella myös yliaaltojen suurimpia arvoja, joita mittausaikana mitattiin. Nämä antavat yhdessä keskiarvolukemien kanssa kuvan siitä, millä tasolla yliaaltopitoisuudet vaihtelevat. Korkeimmat arvot mitattiin kohteissa, joissa oli myös keskiarvollisesti suurimmat yliaaltopäästöt, mikä on ymmärrettävää. Muutamassa kohteessa havaittiin korkeita yliaaltopäästöjä, jotka olivat peittyneet keskiarvostuksen yhteydessä. Näissä tapauksissa kulutus on ollut suurimman osan mittausajasta lähes olematonta, jolloin myös yliaaltopäästöt ovat alhaiset. Mittauksen aikana on ollut vain muutama lyhyempi ajanjakso, jolloin sähköä kulutettiin kohteessa ja yliaaltojen määrä nousi tällöin korkeaksi.

Yliaaltopitoisuudet ovat tämän tarkastelun pohjalta hyvällä tasolla Carunan verkossa, kun verrataan tuloksia standardin sallimiin rajoihin. Suurimassa osassa mitatuissa kohteissa yliaallot ovat erittäin matalalla tasolla ja korkeimmat yliaaltopäästöt havaittiin yksittäisissä teollisuuden ja tuotannon kohteissa. Pienkuluttajat eivät siten ole huomattava tekijä yliaaltopitoisuuksien kasvussa, vaikka kuluttajien kuorma on nykyisin epälineaarisempaa kuin aiemmin. Suuret laitteet ja teollisuus ovat kuitenkin kohteita, joita kannattaa seurata jatkossa verkkoyhtiön näkökulmasta. Osa näistä tuottaa selvästi suuriakin yliaaltopäästöjä, jotka kuluttavat verkkoa ja vaikuttavat sähkönlaatuun.

5.1 Kaupunki- ja haja-asutusalueen vertailu

Sähköverkko on toteutettu hyvin erilaisesti kaupunkialueella verrattuna haja-alueeseen. Carunan verkkoalue koostuu laajalti haja-asutusalueesta, mutta yhtiön verkossa on myös useita kaupunkeja. Nämä kaksi kategoriaa voidaan erottaa toisistaan hyödyntämällä karttatietoja ja tarkastelemalla kohteen aluetta kartalta.

Kaupungeissa verkko on tiivistä ja saman muuntopiirin alle kytketään huomattavasti enemmän liittymiä kuin haja-asutusalueella. Lisäksi kaupunkiverkossa hyödynnetään usein rengasverkkoja, jolloin sähkön syöttö voidaan toteuttaa useamman muuntamon kautta. Tämä parantaa verkon luotettavuutta, sillä vikatilojen ja sähkökatkojen aikana sähkö voidaan tuoda asiakkaille vaihtoehtoisten reittien kautta. Verkko on kaupunkialueilla yleensä ottaen vahva ja sen toimitusvarmuus on korkea. Verkon vahvuudella tarkoitetaan kuorman näkemää impedanssia verkon puolelta. Impedanssin ollessa hyvin matala verkon puolella vastaa vahvaa verkkoa ja vastaavasti korkea impedanssi vastaa heikkoa verkkoa. Tämä korreloittuu myös verkon toimittaman oikosulkuvirran suuruuteen, mutta käänteisesti. Korkea oikosulkuvirta vastaa vahvaa verkkoa ja matala puolestaan heikkoa. Oikosulkuvirran suuruus vaikuttaa oleellisesti siihen, kuinka suuren kuorman verkkoon voidaan kytkeä. Laitteet, joissa on suuri käynnistysvirta, vaativat korkeamman oikosulkuvirran toimiakseen.

Haja-asutusalueella sähköverkko toteutetaan suurimmaksi osaksi radiaalisella, eli säteittäisellä verkolla. Tämä verkko on paljon yksinkertaisempi kuin kaupungeissa yleisesti käytetyt rengasverkot. Säteittäinen verkko koostuu yhdestä muuntamosta, josta sähköä siirretään hajautetusti eri suuntiin. Johtimet eivät kytkeydy verkkoon takaisin johtimen päädyssä vaan loppuvat viimeisen asiakkaan kohdalle. Tällöin vikatilanteen sattuessa muuntamon lähellä, katkeaa sähkön syöttö kaikilta asiakkailta linjan päätyyn asti. Säteittäisessä verkossa on tästä johtuen huonompi sähkön toimitusvarmuus kuin rengasverkossa. Haja-asutusalueilla asiakkaiden määrä on myös paljon harvemmassa kuin kaupungeissa. Yhdessä muuntopiirissä on usein jopa vain yhdestä liittymästä muutamaan kymmeneen liittymään. Tämä vaikuttaa oleellisesti siihen, kuinka vahvaksi verkko on järkevä rakentaa. Verkko rakennetaan kuorman mukaisesti, eikä verkkoa ole kannattava rakentaa ylimitoitetuksi. Oikosulkuvirrat ovat yleensä ottaen alhaisemmat haja-asutusalueella kuin kaupunkialueella, sillä verkko mitoitetaan vastaamaan tarvetta sekä sähköjohtimien vedot ovat yleensä pitkiä haja-asutusalueella ja niiden materiaali- ja rakennuskustannuksissa pyritään säästämään.

Carunan sähköverkossa suoritetuista laatumittauksista suurin osa tehtiin haja-asutusalueelle verrattavalla verkkoalueella. Tehdyistä 125 mittauksesta 93 voidaan katsoa sijaitsevan haja-asutusalueella. Huomioidaan tässä vertailussa ainoastaan pienjännitepuolella tehdyt mittaukset, jolloin haja-asutusalueen mittauksia on yhteensä 87 ja kaupunkialueen mittauksia 27. Tutkiessa haja-asutusalueen mitattujen kohteiden muuntopiiriin muuntajan nimellistehoja, saatiin keskiarvoksi muuntajan koolle noin 100 kVA. Vastaavasti kaupunkialueella muuntajan koko on noin 400 kVA. Muuntajan nimellistehon mitoitus määräytyy muuntopiiriin kytketyn kuorman määrästä, ja tiheästi asutetulla kaupunkialueella tarvitsee suuremman muuntajan. Yhtä lailla voidaan määrittää keskiarvolliset laskelmalliset yksivaiheiset oikosulkuvirrat ja kaupunki- haja-asutusalueille. Kaupunkialueella keskimääräinen laskelmallinen yksivaiheinen oikosulkuvirta on noin 1900 A ja haja-asutusalueella noin 700 A. Näissä arvoissa on huomioitu kaikki kohteet liittymän koosta riippumatta. Mittauskohteiden liittymien koot vaihtelevat 1x25 A pääsulakkeista

aina 3x1000 A pääsulakkeisiin asti. Oikosulkuvirroista saa havainnollisemman kuvan, kun huomioi vain saman kokoiset liittymät. Liittymät suurimmillaan 3x35 A pääsulakkeilla antavat haja-asutusalueen keskimääräiseksi laskelmalliseksi yksivaiheiseksi oikosulkuvirraksi noin 300 A ja kaupunkialueella vastaavasti noin 800 A.

Tehdyissä laatumittauksissa ei huomata merkittävää eroa yliaaltopitoisuuksissa vertaillen kaupunki- ja haja-asutusalueita. Taulukkoon 10 on koottu laatumittauksien tulokset jännitteen kokonaissärölle ja harmonisille yliaalloille, missä kaikkien mittauksien tulokset ovat keskiarvostettu. Kaupunkialueen mittauksissa arvot ovat hieman alhaisemmat kuin haja-asutusalueen mittauksissa, 7. harmonista yliaaltoa lukuun ottamatta. Kuten aiemmin todettiin, haja-asutusalueella verkko on oleellisesti heikompi kuin kaupunkialueella, joka vaikuttaa yliaaltojen hallitsevuuteen verkossa. Haja-asutusalueen korkeampaa yliaaltopitoisuutta ei voida kuitenkaan olettaa johtuvan verkon heikommista oikosulkuvirroista tai pienemmistä muuntajakoneista. Tehdessä regressioanalyysit mittauksien yliaaltopitoisuuksien ja oikosulkuvirtojen välille, ei huomata selvää korrelaatiota tuloksien välillä. Muuntajan nimellistehollakaan ei ollut suoranaista yhtäläisyyttä yliaaltopitoisuuksien kanssa. Yliaaltojen muodostumiseen vaikuttaa niin moni tekijä, että yhtä selittävää tekijää ei voida niiden lähteeksi asettaa. Haja-asutusalueella on suhteessa enemmän teollisuutta ja maatalouskohteita verrattuna pienkuluttajiin kuin kaupunkialueella. Tämän vuoksi myös yliaaltolähteiden vaikutukset ovat huomattavampia haja-asutusalueella.

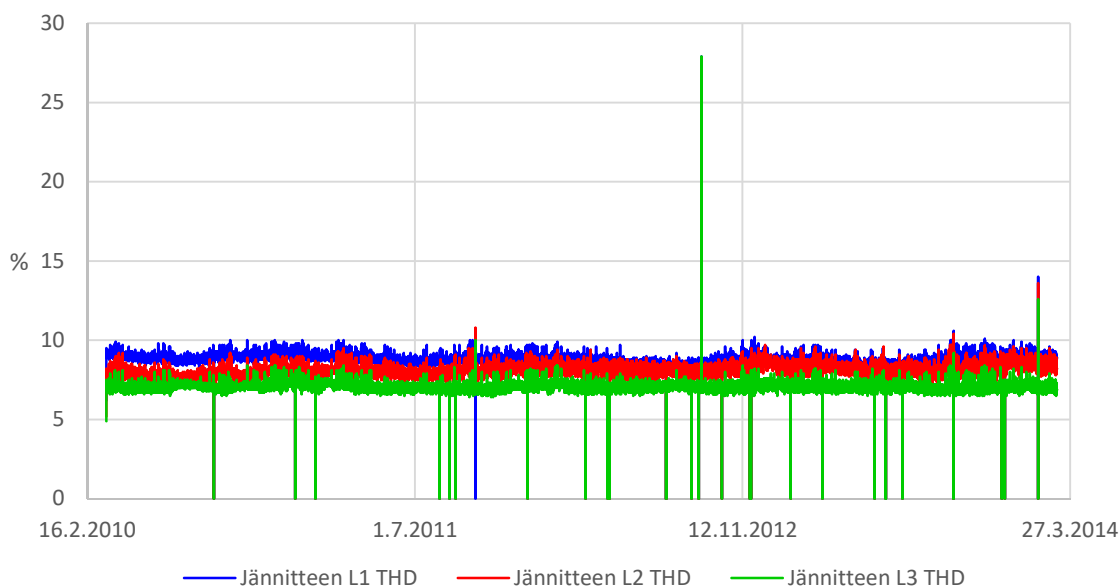
Taulukko 10: Kaupunki- ja haja-asutusalueen keskiarvostetut tulokset jännitteen kokonaissärölle ja harmonisille yliaalloille vaiheittain. Laatumittauksia on 27 kaupunkialueelta ja 87 haja-alueelta. Kaikki tulokset ovat esitetty prosentteina suhteessa perusjännitteeseen.

Jännitteen vaihe	L1	L2	L3
Kaupunki			
THD	0,71	0,60	0,68
THD suurin arvo	1,46	1,46	1,47
3. yliaalto	0,07	0,07	0,06
5. yliaalto	0,20	0,22	0,17
7. yliaalto	0,27	0,25	0,26
3. yliaalto suurin arvo	0,28	0,29	0,30
5. yliaalto suurin arvo	0,77	0,85	0,76
7. yliaalto suurin arvo	0,69	0,70	0,68
Haja-asutus			
THD	0,74	0,64	0,76
THD suurin arvo	1,84	1,80	1,88
3. yliaalto	0,14	0,15	0,14
5. yliaalto	0,25	0,25	0,24
7. yliaalto	0,15	0,14	0,17
3. yliaalto suurin arvo	0,49	0,49	0,46
5. yliaalto suurin arvo	0,90	0,93	0,84
7. yliaalto suurin arvo	0,52	0,57	0,56

5.2 Tuulivoimalat

Carunan sähköverkkoon on kytketty useita tuulivoimatuotantolaitoksia ja osassa näistä on suoritettu laatumittaukset. Tarkastellaan seuraavassa osiossa kolmen tuulivoimalan laatumittauksien tuloksia, jotka ovat kaikki mitattu eri jännitetasoilla. Kutsutaan näitä laitteita: tuulivoimala 1, joka on mitattu pienjännitteen puolelta, tuulivoimala 2, joka on mitattu keskijännitteestä ja tuulivoimala 3, joka on mitattu suurjännitteen puolella. Näistä ensimmäinen toteutettiin Laatuvahtilla ja loput Laatuvahti2:lla.

Tuulivoimala 1 on kytketty keskijänniteverkkoon omalla muuntamolla. Sen tuotannon liittymisteho on 600 kW ja laatumittaus suoritettiin voimalan puolelta, missä on pienjännitetaso. Kohdetta mitattiin lähes neljän vuoden ajan. Mittauksista huomataan, että voimalan jännitteen yliaaltotaso on hyvin korkea. Kuvassa 11 on esitetty tuulivoimalan 1 koko mittausajan jännitteen kokonaissärö eri vaiheissa. Tästä nähdään, että jännitteen kokonaissärö oli vaiheessa L1 jatkuvasti yli standardin salliman 8 % rajan ja osittain yli rajoituksien muissa vaiheissa. Taulukkoon 11 on koottu tuulivoimalan 1 vaihejännitteissä mitattujen kokonaissäröjen keskiarvot ja suurimmat arvot. Vaiheista ainoastaan L3 pysyi standardin rajojen sisällä ja ylitti 8 % rajan vain 833 kertaa, joka on 0,4 % kaikista onnistuneista mittauksista. Suurimpia arvoja määrittäessä, täytyi joka vaiheella mitätöidä noin 20 mittaustulosta, sillä mittaustulos oli virheellinen. Korkeiden kokonaissäröjen lisäksi tuulivoimalassa 1 on hyvin epäsymmetristä sähköntuotantoa, joka näkyy eri vaiheiden kokonaissäröjen poikkeavuudesta. Mittaus kuitenkin suoritettiin tuulivoimalan puolelta, jolloin voimalan liittymispisteessä, eli muuntamon läpi kulkevassa sähkössä, osa yliaalloista eliminoiduu. Muuntaja suodattaa tehokkaasti haitallisia kolmansia harmonisia yliaaltoja, mutta loput yliaalloista saattaa vuotaa sähköverkon keskijännitepuolelle. Lisäksi tuulivoimalan 1 sisäisessä verkossa on kytkettynä paljon teollisuuskuormaa, joka voi osittain selittää korkean yliaaltopitoisuuden. Tuulivoimalan 1 omaksi eduksi on laskea yliaaltojen määrää, sillä laitoksen sisäiset komponentit ja laitteet kärsivät niistä. Verkkoyhtiön näkökulmasta kohdetta kannattaa seurata jatkossa keskijänniteverkon puolelta, jolloin selviäisi verkkoon siirtyvien yliaaltojen määrää.

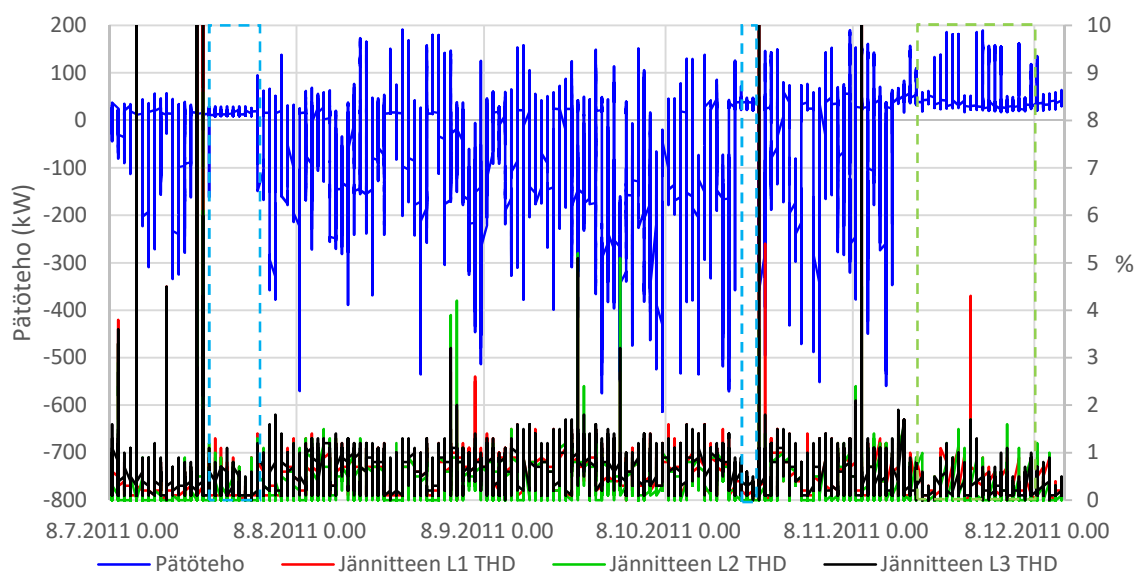


Kuva 11: Tuulivoimalan 1 jännitteen kokonaissärö vaiheittain.

Taulukko 11: Tuulivoimalan 1 jännitteen kokonaissärön lukemat ja mittauksen määrä vaiheittain. Mittauksia on yhteensä 208846 kappaletta.

Jännitteen vaihe	THD L1	THD L2	THD L3
Keskiarvo	8,81 %	8,10 %	7,10 %
Suurin arvo	10,60 %	10,40 %	9,20 %
Kertaa THD ≥ 8 %	208268	129564	833
Määrä mittauksista	99,72 %	62,04 %	0,40 %

Tuulivoimala 2 on hyvin samankaltainen kuin tuulivoimala 1. Molemmissa on yhdistettynä teollisuuskuormaa ja tuulivoimatuotantoa. Tuotannon liittymisteho on 750 kW tuulivoimalassa 2 ja laatumittaus suoritettiin muuntamalla 20 kV keskijännitteen puolelta. Kohdetta mitattiin noin 5 kuukauden ajan ja kuvassa 12 on esitetty mittauksien tulokset kohteen pätöteholle ja jännitteen kokonaissärölle vaiheittain. Mittauksissa oli noin 17 virheellistä mittatulosta vaiheittain, jotka ovat mitätöity tuloksissa. Pätötehon ollessa negatiivinen, tuulivoimala tuottaa enemmän sähköä kuin se kuluttaa. Kuvaan on eritelty vaaleansinisiä alueita ja vaaleanvihreä alue. Vaaleansinisillä alueilla tuulivoimala ei tuota verkkoon sähköä ja sen kulutus on pientä sekä hyvin tasaista. Näinä aikoina kohde on luultavasti suljettuna ja kohteessa kuluu sähköä ainoastaan jatkuvasti päällä olevissa laitteissa. Vaaleanvihreällä alueella kohteessa ei tuoteta verkkoon sähköä, mutta kulutusta esiintyy. Tällöin tuulivoimala on mahdollisesti suljettuna, mutta kohteessa on teollista kuormaa aina arkipäivisin. Taulukossa 12 on koottuna näiden alueiden aikaiset keskiarvot harmonisille yliaalloille ja kokonaissärölle. Taulukkoon on myös lisätty koko mittausajan vastaavat arvot ja vaaleansinisten alueiden välissä olevan mittausajan erittely, jossa oletettavasti kohteessa on samaan aikaan sähköntuotantoa ja teollisuuskulutusta. Tuloksista voidaan päätellä, että kohteessa teollisuuskuorma tuottaa jonkin verran yliaaltoja, sillä vaaleanvihreällä alueella yliaaltopitoisuus on hieman suurempi kuin vaaleansinisillä alueilla. Tuulivoiman tuotanto kuitenkin synnyttää huomattavasti enemmän yliaaltopäästöjä verrattuna muihin tilanteisiin. Nämä arvot ovat silti kokonaisuudessa alhaisia eikä tuulivoimalaa 2 voida pitää merkittävänä yliaaltopäästönä keskijänniteverkkoon.



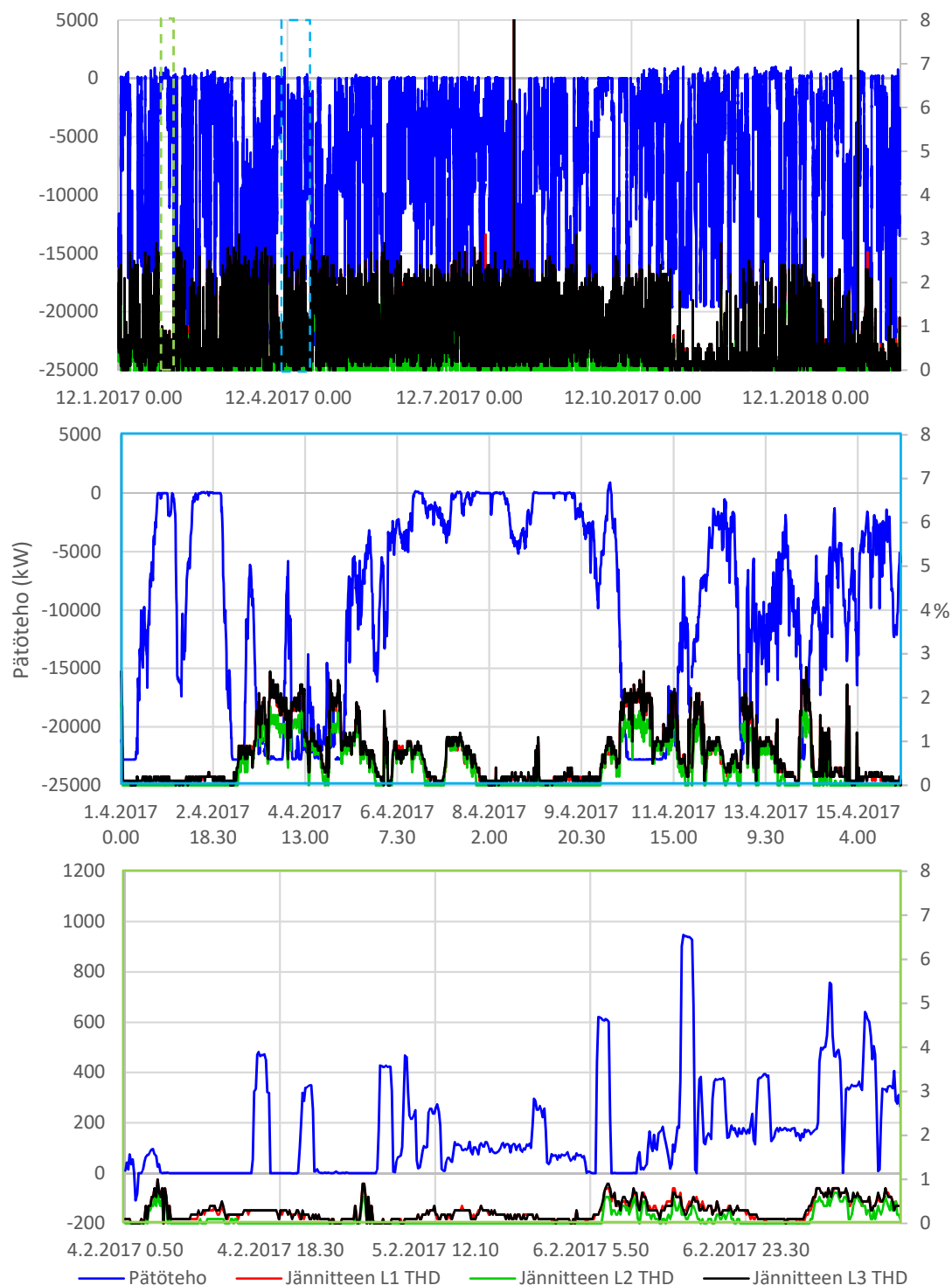
Kuva 12: Tuulivoimalan 2 pätöteho ja jännitteen kokonaissärö vaiheittain.

Taulukko 12: Tuulivoimalan 2 keskiarvot ja suurimmat arvot vaiheittain jännitteen kokonaissärölle ja harmonisille yliaalloille. Kaikki tulokset ovat esitetty prosentteina suhteessa perusjännitteeseen.

Jännitteen vaihe	L1	L2	L3
Koko mittausaika 8.7.2011 9:20 – 12.12.2011 9:00			
THD	0,48	0,34	0,54
THD suurin arvo	3,80	3,30	3,60
3. yliaalto	0,02	0,02	0,02
5. yliaalto	0,09	0,08	0,13
7. yliaalto	0,04	0,02	0,06
3. yliaalto suurin arvo	0,60	0,60	0,80
5. yliaalto suurin arvo	1,10	1,20	1,40
7. yliaalto suurin arvo	0,60	0,60	0,60
Ei tuotantoa, tasainen kulutus 25.7.2011 0:00 – 31.7.2011 23:50			
THD	0,18	0,05	0,20
3. yliaalto	0,02	0,01	0,01
5. yliaalto	0,04	0,03	0,05
7. yliaalto	0,01	0,01	0,04
Ei tuotantoa, tasainen kulutus 19.10.2011 11:50 – 23.10.2011 10:30			
THD	0,15	0,03	0,24
3. yliaalto	0,00	0,00	0,01
5. yliaalto	0,06	0,02	0,11
7. yliaalto	0,01	0,01	0,03
Ei tuotantoa, vaihteleva kulutus 21.11.2011 0:00 – 3.12.2011 23:50			
THD	0,18	0,06	0,25
3. yliaalto	0,02	0,02	0,02
5. yliaalto	0,09	0,05	0,14
7. yliaalto	0,01	0,01	0,02
Tuotantoa ja vaihtelevaa kulutusta 1.8.2011 0:00 – 18.10.2011 23:50			
THD	0,66	0,52	0,70
3. yliaalto	0,02	0,02	0,03
5. yliaalto	0,11	0,11	0,14
7. yliaalto	0,05	0,02	0,08

Tuulivoimala 3 on puhtaasti tuotantolaitos, joka on kytketty 110 kV alueverkkoon. Voimalalla aloitettiin laatumittaus vuoden 2016 lopussa ja mittauksia jatketaan yhä tätä työtä kirjoittaessa. Mittauksissa käytetään Laatuvahti2-mittaria, joka on kytketty suurjänniteverkon puolelle. Tuotantoteho vaihtelee voimakkaasti voimalassa, joka on hyvin tyyppillistä tuulivoimalalle. Kuvassa 13 nähdään tuulivoimalan 3 tuottama pätöteho verkkoon ja verkon jännitteen kokonaissärö vaiheittain. Vaaleansinisellä merkattu ajanjakso 1.–15.4.2017 on valittu vaihtelevan tuotannon vuoksi ja vaaleanvihreällä merkatulla ajanjaksolla 4.–7.2.2017 voimala ei tuota verkkoon sähköä. Kuvasta huomataan korrelaatiota tuulivoimalan tuotannon ja yliaaltopitoisuuksien kanssa. Taulukkoon 13 on merkitty tuulivoimalan 3 keskimääräiset ja suurimmat mitatut arvot harmonisille yliaaltojännitteille. Mittaustuloksista hylättiin ensimmäiset lukemat, sillä ne olivat virheellisiä, ja tuloksien

analysointi alkaa hetkestä 12.1.2017 10:20:00. Tuloksista huomataan selvästi yliaaltopitoisuuden nousu tuulivoimalan tuottaessa sähköä verkkoon. Lukemat pysyvät tästä huolimatta standardin rajojen sisällä eikä tuulivoimala 3 ole huolestuttava yliaaltolähde Carunan verkkoon.



Kuva 13: Tuulivoimalan 3 päätöteho ja jännitteen kokonaissärö vaiheittain.

Taulukko 13: Tuulivoimalan 3 keskiarvot ja suurimmat arvot vaiheittain jännitteen kokonaissärölle ja harmonisille yliaalloille. Kaikki tulokset ovat esitetty prosentteina.

Jännitteen vaihe	L1	L2	L3
Koko mittausaika 12.1.2017 10:20 – 6.2.2018 12:00			
THD	0,73	0,47	0,74
THD suurin arvo	3,10	2,10	3,10
3. yliaalto	0,02	0,02	0,02
5. yliaalto	0,18	0,13	0,19
7. yliaalto	0,06	0,03	0,06
3. yliaalto suurin arvo	0,40	0,30	0,30
5. yliaalto suurin arvo	1,30	1,30	1,40
7. yliaalto suurin arvo	0,90	0,60	0,60
Ei tuotantoa 4.2.2017 1:00 – 7.2.2017 17:00			
THD	0,27	0,11	0,28
3. yliaalto	0,02	0,02	0,02
5. yliaalto	0,15	0,09	0,16
7. yliaalto	0,04	0,04	0,03

Näiden mittauksien perusteella tuulivoimalat ovat selviä yliaaltolähteitä ja niiden liittäminen verkkoon täytyy tehdä huolella. Tuulivoimalassa 1 jännitteen kokonaissärö on jatkuvasti yli standardien sallimien rajojen, joka ei ole hyväksi kuluttajan sisäiselle verkolle eikä Carunan sähköverkolle. Tuulivoimaloiden 2 ja 3 yliaaltojen arvot pysyvät standardin rajoissa, mutta käytetyillä laatumittareilla ei nähdä suurempia harmonisia kertalukuja kuin 7. Aiemmin todettiin (kts. 2.2.1), että tuulivoimaloiden yliaallot painottuvat 40.–60. harmonisille kertaluvuille. Tämän huomaa näissä mittauksissa, että tuulivoimaloissa kokonaissärö kasvaa suhteessa paljon enemmän kuin 3., 5. tai 7. kertaluvun harmoninen yliaalto. Tuulivoimaloita tarvitsee tutkia enemmän tarkemmilla mittalaitteilla, jotta niiden todelliset yliaaltopäästöt selviäisivät.

5.3 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelien suosio on kasvanut runsaasti viime vuosien aikana. Carunan sähköverkkoon liitetään uusia aurinkopaneeleja satoja vuosittain, joiden tehot vaihtelevat muutamista kilowateista jopa megawatin luokkaan. Aurinkopaneeleita ei sallita liitettäväksi heikkoon verkkoon, joka estää paneeleista mahdollisen vahingon aiheutumisen verkkoon. Verkon vahvuutta arvioidaan liittymän laskennallisen yksivaiheisen oikosulkuvirran avulla, jonka teho tulee olla 25 kertainen liitettävien aurinkopaneelien tehoon verrattuna. Suurin verkkoon liitettävien kolmivaiheisten aurinkopaneelien tehon määrä voidaan arvioida seuraavasti;

$$P_A = \frac{3 \cdot 0,23 \text{ kV}}{25} \cdot I_{k1,min} \quad (11)$$

jossa aurinkopaneelien suurin sallittu teho P_A saadaan kilowateissa ja $I_{k1,min}$ on liittymän pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta liittymisjohdon päässä. Jos verkossa oikosulkuvirta

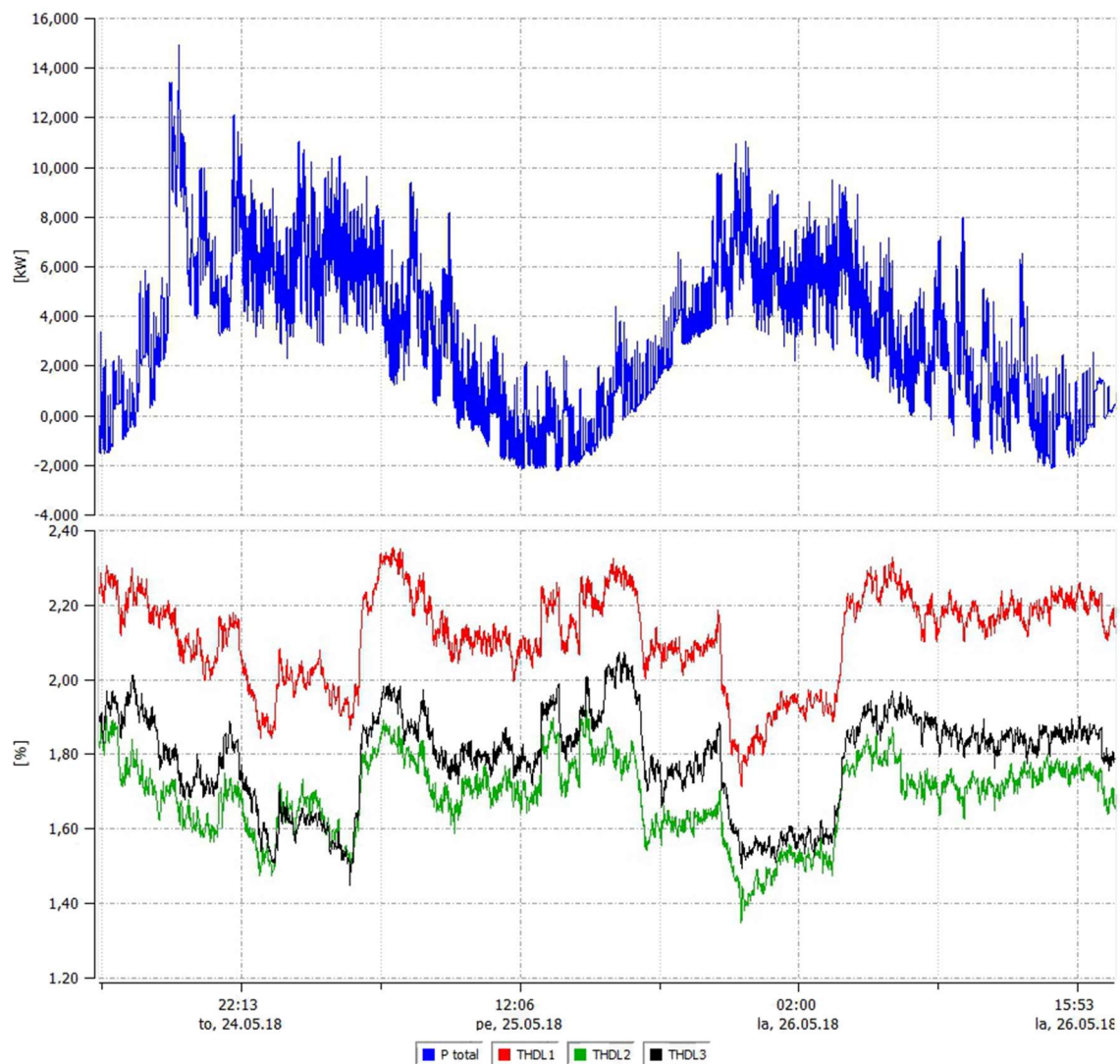
ei näytä laskennallisesti riittävän liitettävien aurinkopaneelien tehoon, voidaan aurinkopaneelien liitettävyyttä vielä tarkistaa simuloimalla verkkoa. Tällöin tarkistetaan, ettei verkossa esiinny yli 4 % jännitteen nousua aurinkopaneelien vaikutuksesta. Näissä toimenpiteissä ei kuitenkaan huomioda aurinkopaneeleista koituvien yliaaltojen vaikutuksia verkkoon, jonka vuoksi on hyvä tehdä tämän kaltainen mittaus.

Tämän työn aikana tehtiin erikoislaatumittaus eräässä kohteessa, jossa on liitetty useampi aurinkopaneelinen liittymä verkkoon. Mittauksissa käytettiin a-eberlen valmistamaa PQ-Box 300 mittaria (kts. 4.2), jolla saadaan mitattua laajasti jännitteen ja virran yliaallot. Mittari asennettiin liittymiä syöttävään jakokaappiin, jossa on lähdöt neljälle omakotitalon liittymälle. Näissä liittymissä kolmeen on asennettu aurinkopaneelit. Mitattu jakokaappi on muuntamossa tämän lähdön ainoa kuorma. Mittari asennettiin jakokaapissa omalle jonovarokeytkimelle mittaamaan jännitteen arvoja ja virran mittaukset otettiin jakokaappiin tulevasta runkoverkosta. Täten saadaan mitattua jokaisen aurinkopaneeliliittymän yhteisvaikutus verkkoon.

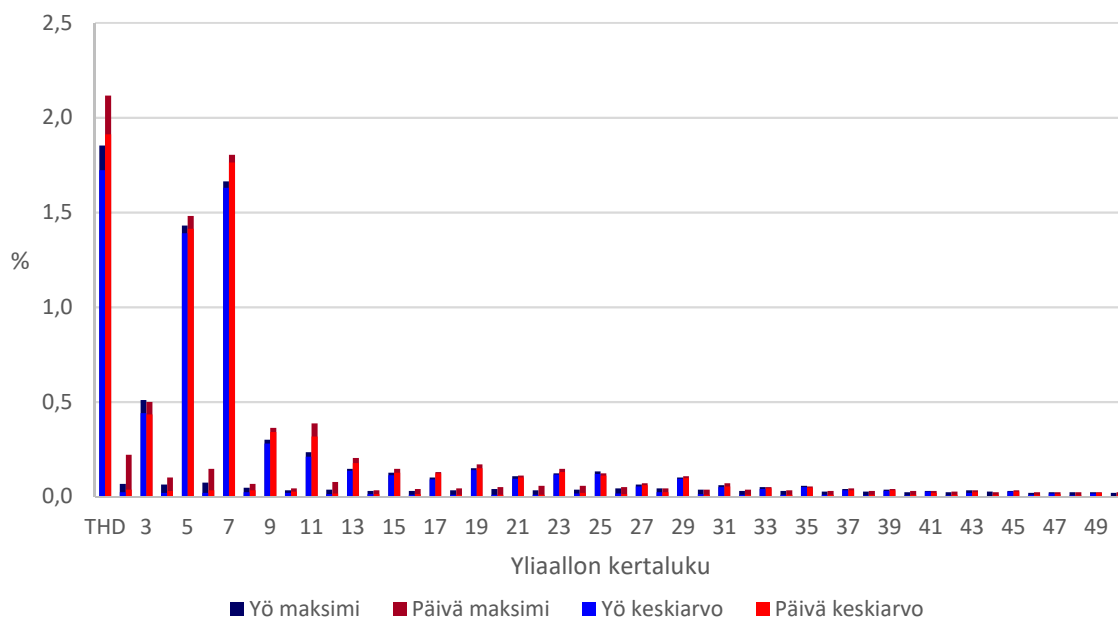
Aurinkopaneelisissa liittymissä kahdessa on yksivaiheiset 1,5 kW tehoiset aurinkopaneelit ja yhdessä on kolmivaiheinen 3 kW tehoinen aurinkopaneeli. Liittymien pienin laskennallinen yksivaiheinen oikosulkuvirta vaihtelee välillä 725–1563 A, joka mahdollistaa kaavan 11 mukaan laskelmallisesti 20–43 kW tehoiset kolmivaiheiset aurinkopaneelit kullekin liittymälle tai vastaavasti 7–14 kW tehoiset yksivaiheiset aurinkopaneelit. Verkko on siis hyvin vahva ja riittävä näiden aurinkopaneelien liittämiseen.

Aurinkopaneelikohdetta mitattiin noin kahden viikon ajan, mutta mittari ei ollut koko mittausajalla yhtäjaksoisesti päällä. Mittaustuloksia saatiin kolmessa osassa yhteensä 11 päivän ajalta. Tulokset ovat hyvin samankaltaiset jokaiselle mitatulle päivälle, joten tarkastellaan tarkemmin ensimmäisten kahden päivän mittauksia. Ensimmäiset mittaukset tehtiin tarkimmalla 200 ms mittausvälillä. Näiden mittauksien aikana jokaisena päivänä oli kirkas aurinkoinen sää, joka varmistuu Ilmatieteenlaitoksen avoimesta datasta saatavasta pilvisyystilastosta. Mittausajanjakson 24.–26.5.2018 aikana alueella oli havaittavissa vähäistä pilvisyyttä ainoastaan päiväaikaan 24.5 kello 18:40–20:00 ja 26.5 kello 10:00–10:50 välisinä aikoina. Näiden vaikutusta ei kuitenkaan huomata mittaustuloksissa, joten voidaan olettaa mittauskohteessa aurinkopaneelien olleen päivisin jatkuvasti auringossa.

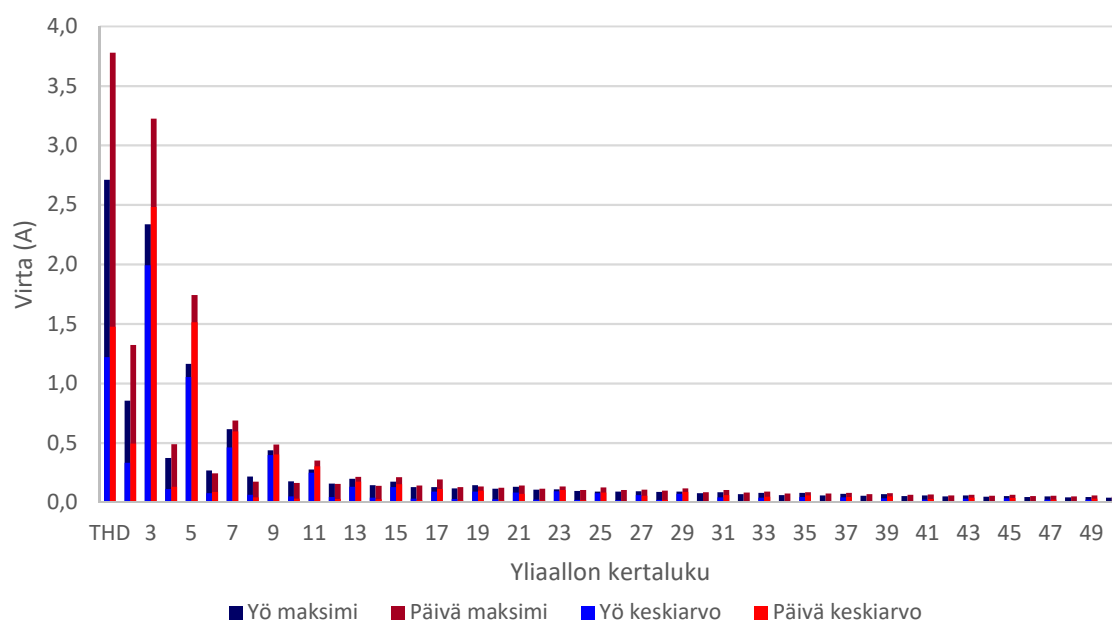
Mittaustuloksissa ei nähdä suurta vaikutusta aurinkopaneeleista sähkönlaatuun. Kuvassa 14 on esitetty kahden päivän tarkastelujakson pätöteho ja jännitteen kokonaissärö vaiheittain. Kuvasta huomataan, että päiväaikaan pätöteho muuttuu negatiiviseksi, jolloin aurinkopaneelit tuottavat enemmän kuin mitä liittymissä kulutetaan sähköä. Jännitteen kokonaissärö näyttää myös kasvavan päiväaikaan, joka voi osittain johtua aurinkopaneeleista, mutta myös sen alkuperä voi olla myös muualta verkosta nimittäin jännitteen kokonaissärön nousu päiväaikaan on yleistä. Kuvissa 15 ja 16 on vielä eriteltynä jännitteen ja virran harmoniset yliaallot 50. kertalukuun asti. Kuvissa näkyy yliaaltojen vertailu yö- ja päiväaikoina, joissa yöaika on 24.5.2018 22:18 – 25.5.2018 4:52 ja päiväaika 25.5.2018 5:19 – 25.5.2018 21:31. Kuvista nähdään, että päiväaikaan sekä jännitteen, että virran yliaallot kasvavat hieman yöaikaan verrattuna. Tämä on ymmärrettävää, sillä päiväaikaan verkossa on enemmän sähkönkulutusta. Aurinkopaneeleilla ei näytä olevan suoranaista näkyvää vaikutusta sähkönlaatuun tässä mittauskohteessa.



Kuva 14: Aurinkopaneelikohteen mitattu pätöteho ja jännitteen kokonaissärö vaiheittain.



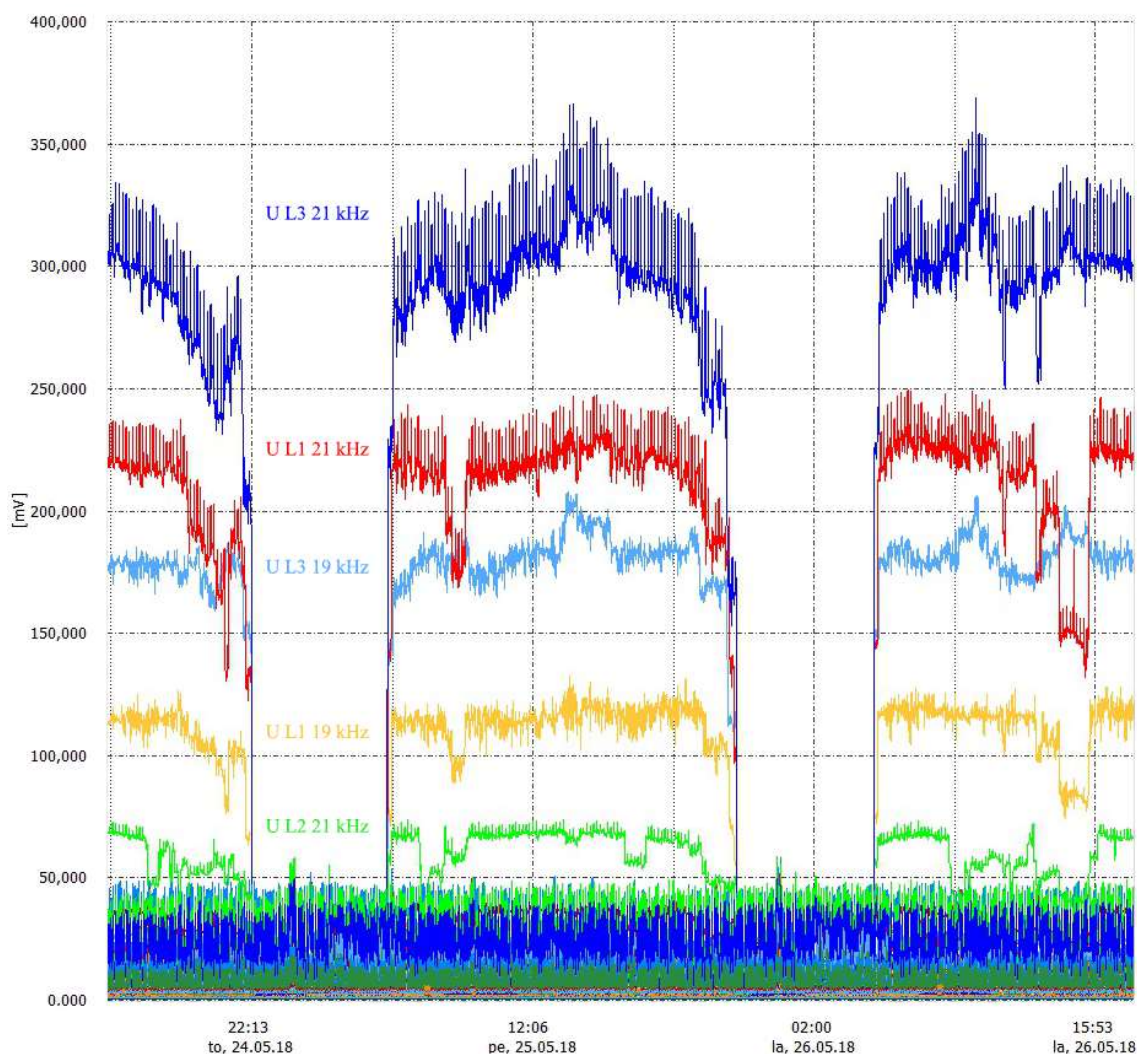
Kuva 15: Aurinkopaneelikohteen mitatut harmoniset yliaaltojännitteet.



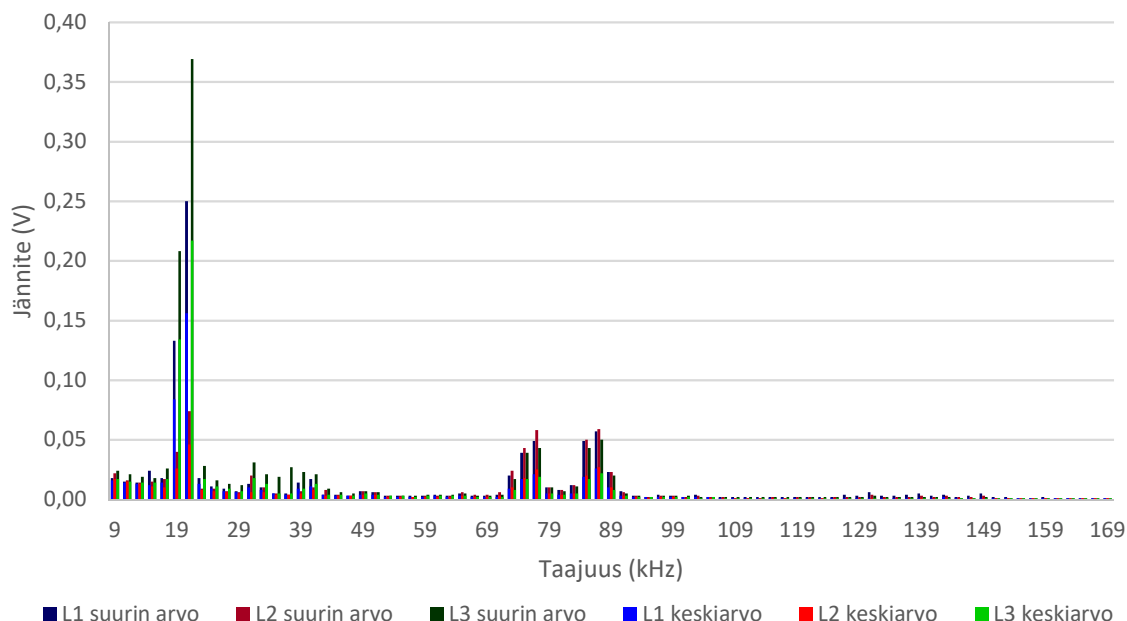
Kuva 16: Aurinkopaneelikohteen mitatut harmoniset yliaaltovirrat.

Aurinkopaneeleissa yliaaltoja tuottaa paneeleihin kytketty invertteri. Invertterin kytkentätaajuus on kuitenkin sen verran korkea, että sitä ei havainnoida sähkönlaadussa tarkasteltavissa taajuusluokissa. Mitatussa aurinkopaneelikohteessa mittarilla saadaan mitattua myös korkeataajuisia yliaaltojännitteitä. Kuvassa 17 nähdään mitatut korkeataajuiset yliaaltojännitteet, missä havaitaan selvästi noin 20 kHz taajuudella korkeampia jännitteen arvoja. Kuvassa 18 esitetään vielä korkeataajuisien yliaaltojännitteiden spektri-

analyysi, jossa huomataan suurimmat arvot 20 kHz taajuudella. Aurinkopaneelien invertterit toimivat tällä taajuudella, minkä vuoksi jännitepiikki näkyy selvästi. Yksivaiheiset aurinkopaneelit ovat luultavasti liitettyinä toinen vaiheeseen L1 ja toinen vaiheeseen L3, sillä kuvassa 18 nähdään selvästi suuremmat 20 kHz taajuuden pitoisuudet näillä vaiheilla. Voidaan olla hyvin varmoja siitä, että aurinkopaneelien invertteri on 20 kHz taajuuden jännitteen lähde, sillä kuvassa 17 huomataan, että taajuudet esiintyvät tuloksissa ainoastaan päiväaikana. Invertterien 20 kHz taajuus ilmestyy mittaustuloksiin noin puolituntia auringonnousun jälkeen, ja yhtä lailla se häviää noin puolituntia ennen auringonlaskua. Invertterien kytkentätaajuus ei aiheuta kuitenkaan suuria häiriöitä jännitteeseen, sillä sen suurimmat arvot ovat 350 mV luokkaa. Tämä taajuus voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia verkkoon kytketyissä laitteissa, jotka toimivat samalla taajuudella. Verkossa voi myös ilmentyä resonanssia, joka voi olla haitaksi. Kuvassa 18 huomataan myös pienemmät jännitepiikit 75 kHz ja 85 kHz taajuuksilla. Nämä taajuudet ovat verkon sähkönkulutusmittarien PCI-taajuuksia, joiden avulla verkkoyhtiö siirtää kulutustiedot mittareilta verkkoyhtiölle.



Kuva 17: Aurinkopaneelikohteen mitatut taajuuksien 9–169 kHz yliaaltojännitteet.



Kuva 18: Aurinkopaneelikohteen mitatut arvot vaiheittain korkeataajuuksien yliaaltojännitteille koko mittausajalta 24.5.2018 15:08 – 26.5.2018 17:45.

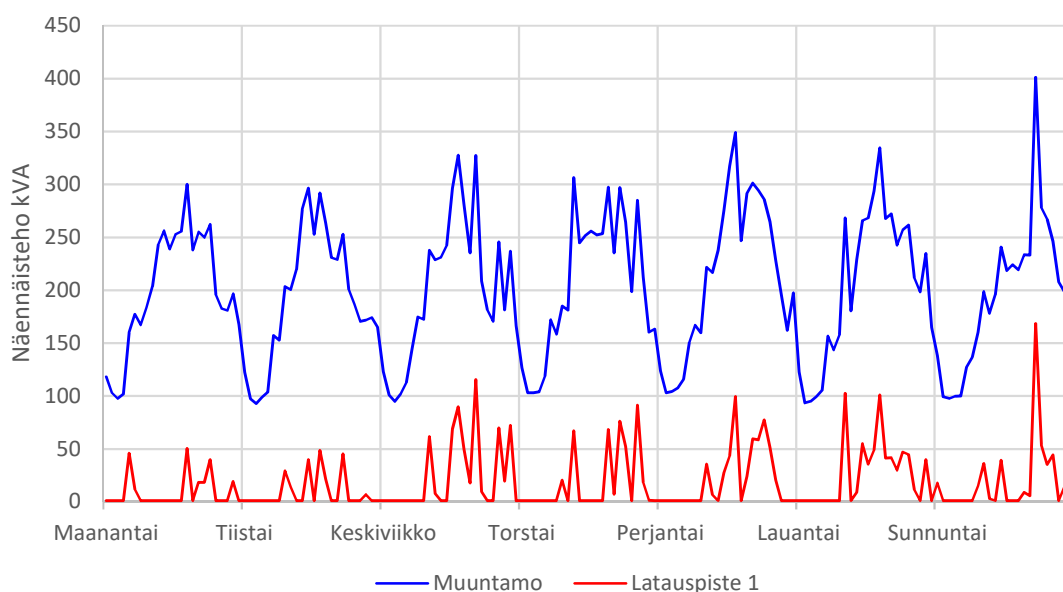
Mitatussa aurinkopaneelikohteessa ei huomattu sähkönlaadulle haitallisia mittaustuloksia. Aurinkopaneelien invertterien tuottamat yliaallot jäivät standardien sallimien raja-arvojen alle mittauspisteessä, vaikka tosin mitattu virran suhteellinen kokonaissärö sai suuria arvoja. Virran kokonaissärö sai koko mittausajalta keskimääräisen arvon 32 %, joka ylittää reilusti paikalliselle tuotannolle määrätty 5 % rajan (kts. 2.2.1). Tämä kuitenkin selittyy sillä, että mittauspisteessä mitattiin aurinkopaneelien tuottaman virran lisäksi myös kulutusvirtaa. Nämä kaksi virtaa ovat suunnaltaan toisiaan vastaan, jolloin referenssivirta, eli kuormavirta kumoutuu osittain ja saa pieniä arvoja. Tällöin kokonaissärön vertaaminen kuormavirtaan antaa liian suuria arvoja.

5.4 Sähköautojen latauspisteet

Carunan verkkoon on kytketty useita sähköautojen latauspisteitä. Suurin osa näistä on pienitehoisia koti- tai talonyhtiölatauspisteitä, mutta verkkoon kytketään kiihtyvään tahtiin myös itsenäisiä pikalatauspisteitä. Näiden tehot vaihtelevat useista kymmenistä kilowateista jopa satoihin kilowatteihin. Pikalatauspisteet voivat aiheuttaa verkkoon suuren määrän yliaaltoja varsinkin, jos niitä on keskitetty paljon saman muuntopiirin alle.

Tämän työn aikana asennettiin laatumittareita mittaamaan kohdetta, jossa on saman muuntopiirin alla kaksi eri valmistajan itsenäistä sähköautojen latauspistettä. Nämä latauspisteet saavat jakokaapista omat syöttökaapelit ja kummallekin latauspisteelle asennettiin oma laatumittaus. Laatumittarina käytettiin molemmissa MX Electrix Oy:n valmistamaa eQL Laatuvahti2 -mittaria. Kutsutaan näitä sähköautojen latauspisteitä latauspisteeksi 1 ja latauspisteeksi 2. Latauspisteen 1 liittymisteho on 277 kVA ja latauspisteen 2 on vastaavasti 69 kVA. Muuntopiirin muuntajan nimellisteho on 800 kVA. Muuntopiiriin on kytketty neljä muuta liittymää, joiden yhteenlaskettu tehokulutus vaihtelee 90–

260 kVA välillä. Latauspisteille mitoitettu teho on siten suuri osa muuntajan nimellistehosta, joten sähköautojen latausteho voi ylittää 20 % muuntajan syöttämästä näennäistehosta. Tällöin tehtyjen tutkimusten mukaan (kts. kohta 2.2.2) oletettavaa on, että näemme kohonneita yliaaltopitoisuuksia sähköauton latauksen aikana. Kuvassa 19 on esitetty erään viikon tuntikohtaiset tehotiedot muuntamolta ja latauspisteeltä 1. Kuvasta 19 nähdään selvästi, että latauspisteellä 1 on suuri vaikutus muuntopiirin tehojakaumaan. Latauspisteen 1 kulutuspiikit näkyvät muuntamolla tehopiikkeinä. Tehotiedot ovat saatu muuntopiirin liittymien kulutustiedoista.

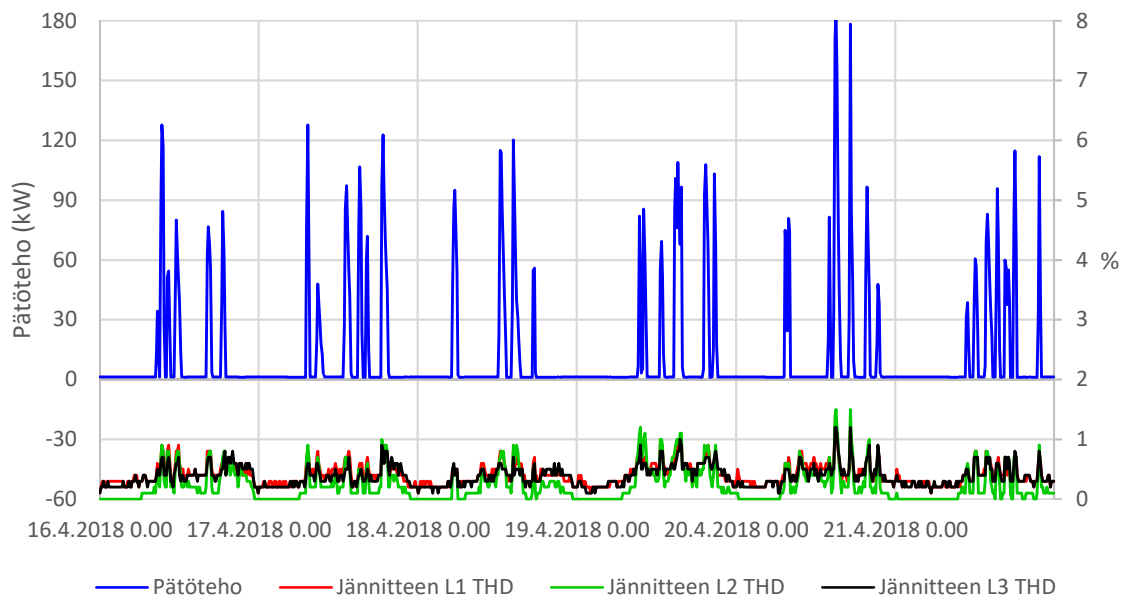


Kuva 19: Viikon mittaisen ajanjakson tuntikohtaiset näennäistehot koko muuntopiirille ja latauspisteelle 1.

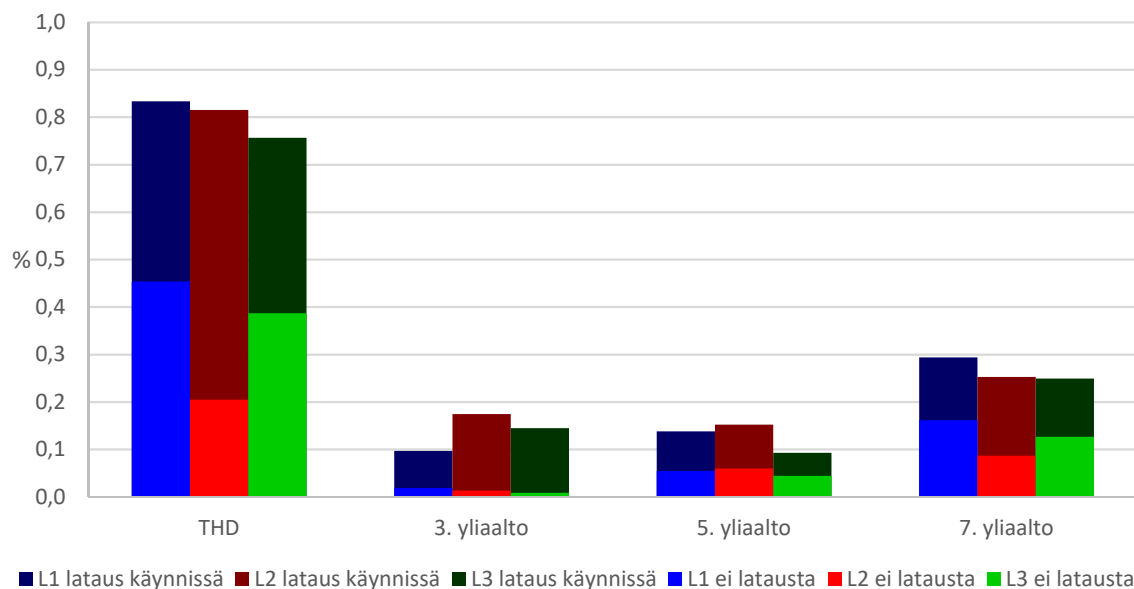
Latauspisteitä mitattiin hieman yli kuuden viikon ajan, mutta mittaustuloksista on mitätöity ensimmäinen ja viimeinen viikko. Näillä viikoilla mittaustuloksissa oli havaittavissa suuria yliaaltomääriä, jotka ilmenivät johtuvan vaiheen L1 putoamisesta verkosta. Hyödynnettäviä mittaustuloksia saatiin kuitenkin 30 päivän ajalta. Kuvassa 20 nähdään erään aktiivisen latausviikon ajan latauspisteen 1 pätöteho ja jännitteen kokonaissärö vaiheittain. Kokonaissärön määrä vaihtelee päivä- ja yöaikoina, mikä on tavanomaista kaupunkialueen kohteissa. Nämä yliaallot ovat luultavimmin peräisin osittain muuntopiirin muista liittymistä, mutta suurimakseen osaksi muuntamon keskijännitepuolelta. Kolmannen harmonisen yliaallon osuus on hyvin pieni mittaustuloksissa, kun latauspiste 1 ei lataa sähköautoa. Tämä indikoi sitä, että taustalla näkyvät yliaallot tulevat todennäköisesti keskijännitteen puolelta.

Latauspiste 1 tuottaa selvästi verkkoon yliaaltoja. Kuvassa 20 huomataan, että latausjakson aikana kokonaissäröön ilmestyy tehokulutuksen mukainen piikki. Kuvaan 21 on tehty vertailu latauksen aikana ja lataamattoman ajan välille. Latauksen ajaksi on otettu kaikki mittaustulokset, joissa latauspisteen 1 näennäisteho ylitti 30 kVA. Vastaavasti lataamattomaksi ajaksi on oletettu mittaustulokset, joissa näennäisteho jää alle 5 kVA. Jännitteen kokonaissärö kasvoi latauksen aikana taustan kokonaissäröstä keskimäärin noin 160 %, kolmannen yliaallon määrä kasvoi puolestaan 1100 %, viides yliaalto 140 % ja

seitsemäs yliaalto 120 %. Yliaaltojen määrän nousu oli oletettavaa, sillä latauspisteen 1 mitoitus teho on suuri osa muuntopiirin muusta kuormasta. Tällöin epälineaarisen kuorman osuus on mittava ja lineaarisen kuorman vaimentavaa vaikutusta yliaaltoihin ei nähdä. Yliaallot jäävät kuitenkin latauksen aikana alle standardien sallimien rajojen, mutta latauspisteen 1 vaikutus verkkoon on huomattava.

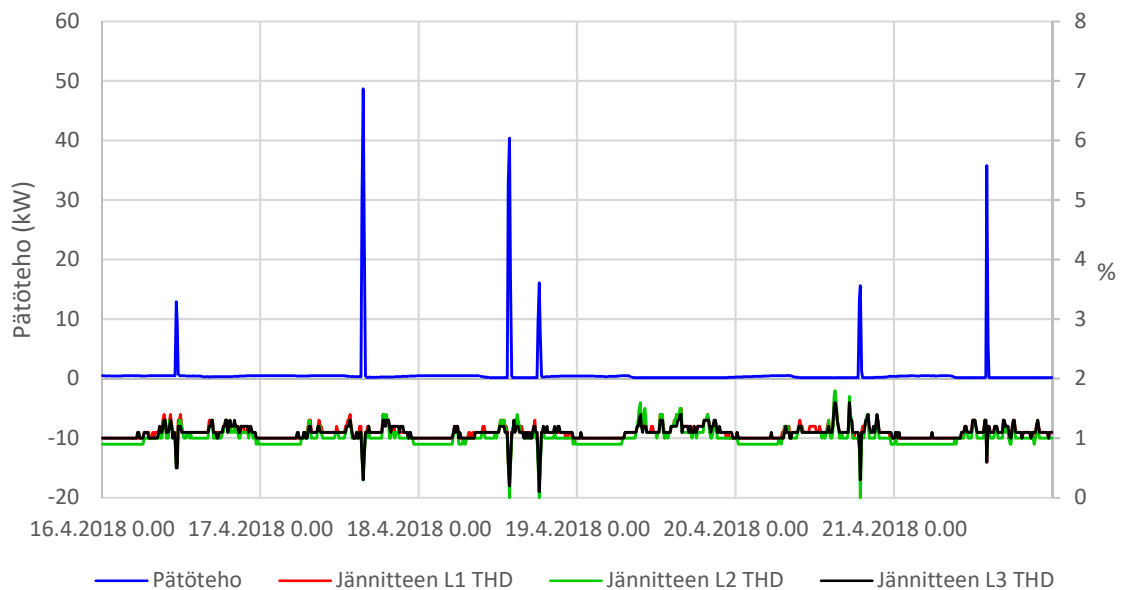


Kuva 20: Latauspisteen 1 pätöteho ja jännitteen kokonaissärö vaiheittain.



Kuva 21: Latauspisteen 1 jännitteen kokonaissärö ja harmoniset yliaallot vaiheittain latauksen aikana sekä muuna aikana.

Latauspisteen 2 mittaustuloksissa on nähtävissä mittausvirhettä. Kokonaissärössä huomataan noin prosentin häiriökomponentti, joka vaikuttaa koko mittausajanjakson tuloksiin. Kuvassa 22 on esitetty latauspisteen 2 jännitteen kokonaissärö vaiheittain ja pätöteho. Tarkasteltava mittausaika on sama kuin latauspisteessä 1. Kuvassa nähdään häiriökomponentin pitävän kokonaissärön jatkuvasti noin 1 % arvossa ja ainoastaan sen ylittävät arvot ovat rekisteröityneet. Huomataan myös, että latauspisteen 2 ladatessa sähköautoa, kokonaissärön määrä tippuu alas. Näillä tuloksilla ei voida tehdä johtopäätöksiä latauspisteen 2 aiheuttamista yliaalloista verkkoon, mutta tuloksista nähdään kuitenkin latauspisteen 1 vaikutuksen. Latauspisteen 1 yliaaltopiikit näkyvät myös latauspisteen 2 mittauksissa. Yliaallot siirtyvät tämän perusteella vaivatta jakokaapista muihin liittymiin ja oletettavasti myös samankaltaisista liitännöistä kuten muuntamon pienjännitekeskuksesta ja ilmajohtojen liittimistä sähköpylväillä.



Kuva 22: Latauspisteen 2 pätöteho ja jännitteen kokonaissärö vaiheittain.

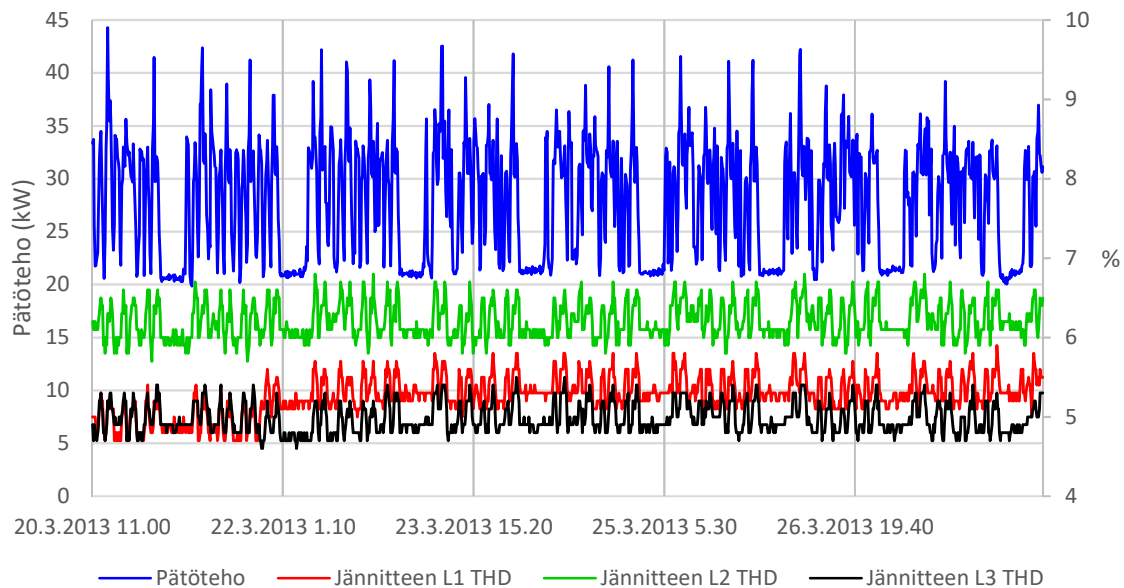
Sähköautojen latauspisteiden mitatut yliaallot vastaavat hyvin teorian esittämiä väitteitä. Latauspisteiden ottaman tehon osuuden kasvaessa suureksi muuntamon syöttämästä tehosta, nähdään korkeaa nousua yliaaltopitoisuuksissa. Yliaaltotaso säilyi tästä huolimatta kohtuullisena koko mittausajanjakson, joten välitöntä harmia nämä latauspisteet eivät aiheuta verkkoon. Huomattavaa on kuitenkin se, että kohteessa on mahdollisuus ladata useampaa sähköautoa samaan aikaan, mutta tällaista tilannetta ei havaittu mittauksien aikana. Yhden latauspisteen aiheuttamat yliaallot ovat jo selvästi nähtävissä mittaustuloksissa, jolloin useamman sähköauton yhtäaikainen lataaminen voi osoittautua haitalliseksi verkolle ja muille liittymille. Erityisesti latauspisteen 1 mittaustuloksissa nähtävä kolmannen harmonisen yliaallon nousu voi aiheuttaa verkkoon ongelmia, jos useampi sähköauto on samaan aikaan latautumassa. Tällöin kolmannet harmoniset yliaallot summautuvat latauspisteiden kesken ja voivat siten aiheuttaa virtapiikkejä nollajohtimissa. Sähköautojen latauspisteiden mitoituksessa tulee huomioida mahdolliset latauksien yhteisvaikutukset ja verkossa jo esiintyvät yliaallot, jotta kolmansien harmonisten yliaalto-

jen summautumisesta ei koidu ongelmia. Lisäksi muuntopiiriä syöttävä muuntaja on mitoitettava siten, että se ei rasitu liiallisesti latauspisteiden tehopiikkien aikana ja muuntopiirissä on hyvä olla tarpeeksi lineaarista kuormaa vaimentamassa syntyneitä yliaaltoja.

5.5 Yliaaltojen lähteet ja kulkeutuminen

Tehdyissä laatumittauksissa nähdään selviä yhtäläisyyksiä korkeiden yliaaltopitoisuuksien kohteissa. Nämä kohteet ovat lähes poikkeuksetta aina suuria sähkönkulutus kohteita, joissa on oletettavasti teollisuutta tai sähköntuotantoa. Kuitenkaan jokainen mitattu suurempi kohde ei tuottanut suuria yliaaltopitoisuuksia, joten suuren kulutuksen kohdetta ei voida aina olettaa myös tuottavan yliaaltoja. Suuremmassa kohteessa sähkönkulutuksen luonne vaikuttaa oleellisesti yliaaltojen muodostumiseen. Sähköntuotannossa puolestaan pienemmät kohteet ovat yleensä ottaen enemmän yliaaltoja tuottavia kuin suuret laitokset. Tämä johtuu osaksi siitä, että suurilla sähköntuottajilla on tarkemmat vaatimukset tuotetulle sähkölle. Suurimmat yliaaltopäästöt sähköntuotantokohteessa tulevat kohteista, joissa tuotanto on tarkoitettu kohteen sisäiseen käyttöön. Näissä kohteissa sähkönlaatua ei yleensä tarkkailla eikä siitä olla välttämättä ollenkaan tietoisia. Ensisijaisesti näissä kohteissa sisäinen verkko kärsii huonosta sähkönlaadusta, mutta yliaaltoja voi vuotaa myös verkkoon ja muille kuluttajille. Nämä kohteet sisältävät usein paikallista pientuotantoa tai oman varageneraattorin.

Kuten aiemmin todettiin, eräessä maatilakohteessa kuluttajan oma generaattori on todennäköisin syy korkeisiin yliaaltopitoisuuksiin, sillä kohteessa on hyvin korkea kolmannen yliaallonpitoisuus. Kuvassa 23 esitetään tämän kohteen pätöteho ja jännitteen kokonaissärö eri vaiheissa. Taulukkoon 14 on koottuna maatilakohteen mitatut keskiarvot ja suurimmat arvot yliaalloille. Tuloksista huomataan, että yliaaltotaso on jatkuvasti erittäin korkealla ja niiden tuotto mukailee kohteen kulutusta. Maatilakohde on siis epäilemättä vastuussa korkeista yliaaltopitoisuuksista ja erityisesti sen tuottamasta kolmannesta harmonisesta yliaallosta. Tämä kohde on muuntamosta katsoen ainoa kuluttaja pienjännitehaarassa, joten kolmas yliaalto ei voi olla peräisin muuntamon keskijännitepuolelta. Tuloksista nähdään, että kohteessa kolmas yliaalto ylittää jo standardin antamat rajat (kts. taulukko 4). Näin korkea kolmas harmoninen yliaalto voi aiheuttaa ongelmia nollajohtimien suojuuksissa.



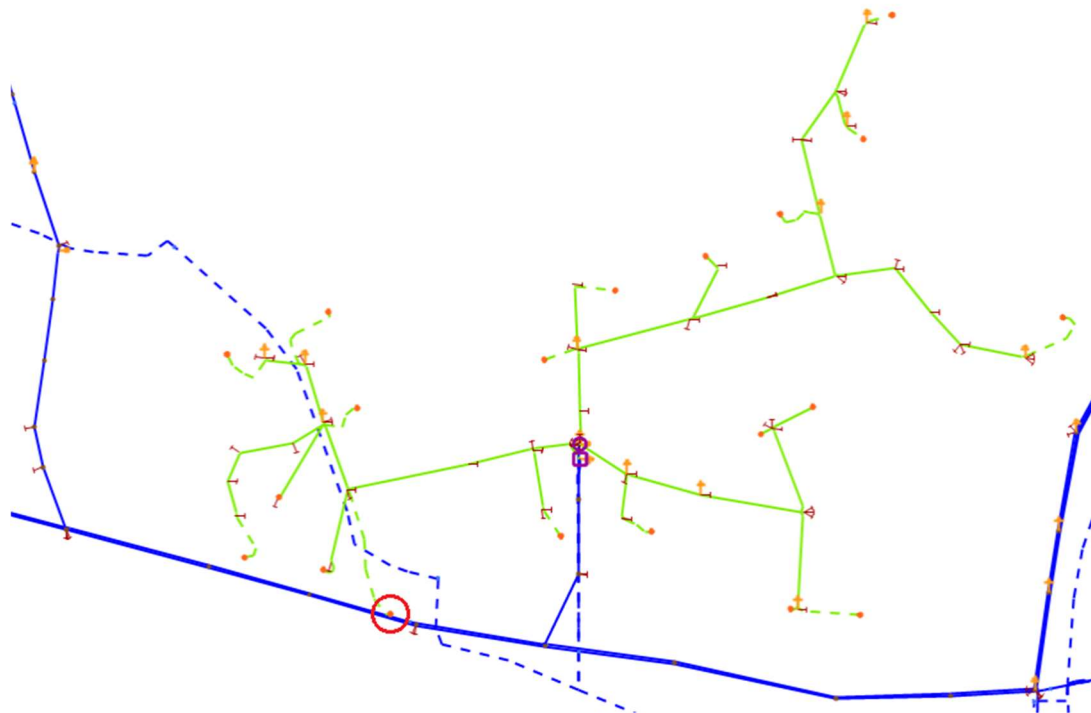
Kuva 23: Omalla generaattorilla varustetun maatilakohteen pätöteho ja jännitteen kokonaissärö vaiheittain.

Taulukko 14: Omalla generaattorilla varustetun maatala kohteen keskiarvot ja suurimmat arvot vaiheittain jännitteen kokonaissärölle ja harmonisille yliaalloille. Kaikki tulokset ovat esitetty prosentteina suhteessa perusjännitteeseen.

Jännitteen vaihe	L1	L2	L3
THD	5,28	6,21	4,98
THD suurin arvo	5,90	6,80	5,50
3. yliaalto	4,62	5,44	4,26
5. yliaalto	0,47	0,56	0,46
7. yliaalto	0,12	0,31	0,20
3. yliaalto suurin arvo	5,20	6,10	4,70
5. yliaalto suurin arvo	0,70	0,80	0,70
7. yliaalto suurin arvo	0,20	0,70	0,60

Laatumittauksien perusteella on hankala arvioida yliaaltojen kulkeutumismekanismia verkossa. Carunan suorittamat laatumittaukset ovat hyvin hajautetusti eri puolilla verkkoaluetta, joten ei ole mahdollista tehdä kattavaa päätelmää, kuinka yliaallot kulkeutuvat. Tehdyistä laatumittauksista ilmenee kuitenkin yhtäläisiä piirteitä kohteiden yliaaltopitoisuuksissa. Useassa kohteessa on nähtävissä vaihtelevaa yliaaltopitoisuutta, joka ei oletettavasti ole peräisin itse mitatusta kohteesta. Näissä mittauksissa kohteen kulutus ei vastaa mitattua kokonaissäröä, kuten havaittiin tyypillisessä teollisuuden tai tuotannon kohteessa. Yliaallot kuitenkin muistuttavat useassa mitatussa kohteessa hyvin paljon teollisuuskohteen ominaista yliaaltopäästöikäyrää, vaikka lähistöllä ei sijaitsekaan tällaisia kohteita. Tämä indikoisi sitä, että yliaallot ovat kulkeutuneet keskijänniteverkon puolelta pienjänniteverkkoon. Monessa kohteessa oli havaittavissa tällaista yliaaltojen kulkeutumista, eikä verkon rakennustapa näyttänyt vaikuttavan yliaaltojen kulkeutumiseen. Näistä lähteistä peräisin olevat yliaallot kulkeutuvat vaivatta niin maakaapelissa kuin ilmajohdossa, sekä mahdollisesti hyvin pitkiä matkoja verkossa.

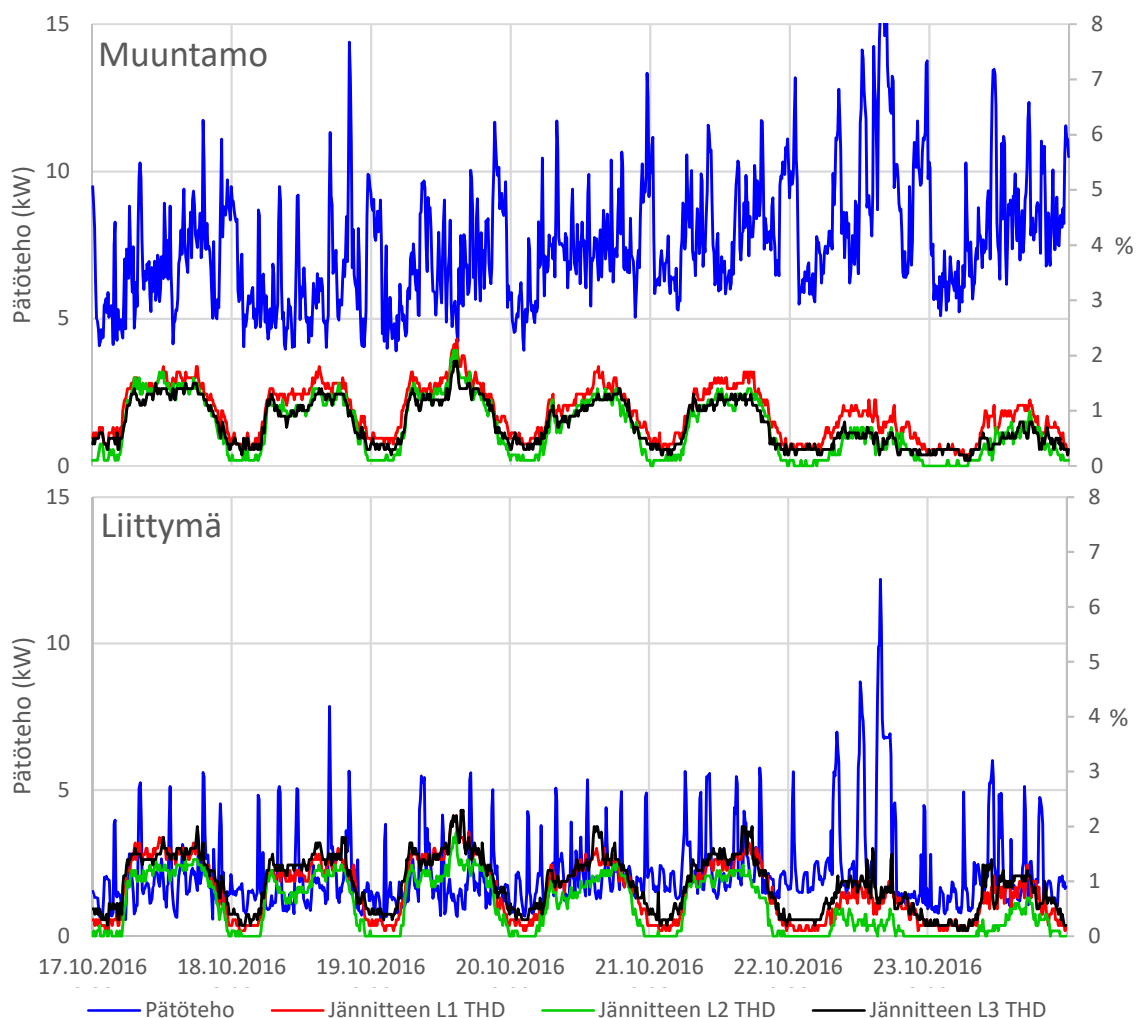
Laatumittauksia on tehty saman muuntopiirin alla useampaan kohteeseen vain muutamassa paikassa. Näissä kohteissa yliaaltojen käyttäytyminen oli hyvin samankaltaista kaikissa mitatuissa kohteissa, joka osoittaisi sen, että yliaallot liikkuvat melko vapaasti verkossa. Tarkastellaan tarkemmin erästä mitattua kohdetta, jossa mitattiin samaan aikaan yhtä liittymää sekä muuntopiirin muuntajaa. Molemmat mittaukset tehtiin pienjännitepuolella ja niissä käytettiin laatuvahti2-mittaria. Kuvassa 24 on esitetty kyseinen muuntopiiri, jossa mittaukset suoritettiin violetilla ympyrällä merkatulla pylväsmuuntamolla ja punaisella ympyrällä merkatulla liittymällä. Pienjänniteverkko on merkattu vihreällä ja keskijänniteverkko sinisellä, joissa katkoviiva on maakaapelia. Muuntopiirin alla on yhteensä 20 liittymää, joista jokainen on 3x25A suuruinen omakotitalokohde.



Kuva 24: Muuntamon ja sen syöttämän liittymän verkko. Laatumitattu liittymä on merkattu punaisella ja laatumitattu muuntamo on violetti ympyrä.

Kuvassa 25 nähdään kummankin kohteen mitatut pätötehot sekä jännitteen kokonais-särö vaiheittain. Mittausjakso alkaa maanantaista ja loppuu sunnuntaihin. Kuvasta huomataan selvästi korkeampaa yliaaltopitoisuutta aina arkisin päiväaikaan, joka vastaa hyvin tarkasti teollisuuskohteelle tai kaupunkialueelle ominaista yliaaltokäyttäytymistä. Teollisuuskohteissa tehdyissä laatumittauksissa oli selvästi suuremmat yliaaltopitoisuudet aina arkisin päiväaikaan, jolloin tehdas tai laitos on käytössä. Pätötehotkäyrä sekä muuntamolla, että liittymällä näyttää tyypilliseltä omakotitalon kulutuskäyrältä, jossa nähdään suurempaa kulutusta ilta-aikaan ja viikonloppuisin. Näinä aikoina ihmiset ovat yleensä kotona ja käyttävät sähköä. Kummankaan mittauskohteen kulutus ei näytä mukailevan mitattuja yliaaltoja, joten on oletettava niiden tulevan keskijännitepuolelta. Tätä oletusta vahvistaa taulukossa 15 esitetyt tulokset muuntamolla suoritetusta laatumittauksesta. Tuloksista nähdään, että kolmas harmoninen yliaalto on selvästi alhaisempi kuin muut, joka voi selittyä sillä, että yliaallot ovat peräisin muuntamon toiselta puolelta keskijännitever-

kosta. Muuntopiirin läheisyydessä ei ole teollisuuskohteita, mikä viittaa siihen, että yliaallot voivat olla peräisin pitkän matkan päästä ja ne voivat olla peräisin useammasta eri kohteesta.



Kuva 25: Muuntamon ja sen syöttämän liittymän mitatut pätötehot sekä jännitteen kokonaissärö vaiheittain. Mittausajan jakso alkaa maanantaista ja päättyy sunnuntaihin.

Taulukko 15: Muuntamon keskiarvot ja suurimmat arvot vaiheittain jännitteen kokonaissärölle ja harmonisille yliaalloille. Kaikki tulokset ovat esitetty prosentteina suhteessa perusjännitteeseen.

Jännitteen vaihe	L1	L2	L3
THD	0,88	0,60	0,69
THD suurin arvo	2,30	2,10	1,90
3. yliaalto	0,08	0,07	0,06
5. yliaalto	0,67	0,46	0,46
7. yliaalto	0,08	0,03	0,12
3. yliaalto suurin arvo	0,20	0,30	0,30
5. yliaalto suurin arvo	2,00	1,90	1,70
7. yliaalto suurin arvo	0,40	0,30	0,40

6 Yliaaltojen vaikutus Carunan verkkoon

Yliaaltojen vaikutukset sähköverkossa näkyvät selvintä niissä koituneissa sähköisissä häviöissä. Häviöiden lisäksi verkossa saattaa tapahtua toimintahäiriöitä verkon komponenteissa ja verkkoon liitetyissä laitteissa. Tällaisia tapauksia on vaikea ennustaa ja ehkäistä, joten niiden tutkiminen yleisellä tasolla on haastavaa. Yliaalloista aiheutuneiden häviöiden määrää voidaan kuitenkin arvioida. Häviöt tuovat välitöntä harmia verkossa kaapeleihin, ilmajohtoihin ja verkon komponentteihin. Tämän lisäksi verkkoyhtiö joutuu korvaamaan verkossa tapahtuneiden sähköisten häviöiden rahallisen arvon. Tässä kappaleessa tarkastellaan häviöitä Carunan verkossa ja yliaaltojen osuutta niissä, sekä arvioidaan yliaalloista koituvia taloudellisia vaikutuksia.

6.1 Yliaalloista aiheutuvat häviöt

Sähköverkossa koituu välttämättä häviöitä johtimissa ja verkon komponenteissa. Sähköinen resistanssi vastustaa virran kulkua ja tämä näkyy johtimissa lämpönä. Häviöiden määrää pyritään aina vähentämään, joka on teknistaloudellisesti aina kannattavaa. Sähkölaitteiden sekä komponenttien sähköiset ominaisuudet ovat yleensä määritelty tasavirralla tai verkon perustaajuudelle. Yliaaltojen esiintyminen verkossa kuitenkin kasvattaa häviöiden määrää virranahdon seurauksesta, sekä alentaa esimerkiksi kaapelien ja muuntajien suurinta mahdollista kuormitettavuutta lämpötilan nousun vuoksi. Verkossa esiintyvät häviöt jäävät verkkoyhtiön korvattavaksi, joten niiden seuraaminen sekä alentaminen on verkkoyhtiölle erityisen tärkeää. Verkon perustaajuudella tapahtuvilta häviöiltä ei voida välttyä, ja niiden määrään voidaan ainoastaan vaikuttaa käyttämällä vähemmän resistiivisiä kaapeleita ja ilmajohtoja. Tämä on kuitenkin hyvin kallista ja verkon kaapelit sekä ilmajohtot mitoitetaan kuormituksen suhteen eikä häviöiden vähentämiseen. Yliaaltojen aiheuttamiin lisähäviöihin voidaan kuitenkin vaikuttaa joko eliminoimalla ne verkosta, tai ennaltaehkäistä niiden esiintyvyyttä.

Tässä osiossa tarkastellaan yliaaltojen aiheuttamia lisähäviöitä verkon johtimissa ja muuntajissa. Yliaaltojen vaikutukset eivät rajoittaudu näihin, mutta nämä ovat sähköverkon yleisimpiä komponentteja ja niissä koituvat häviöt ovat koko verkon mittakaavassa runsaita. Häviöitä syntyy verkossa monessa eri muodossa kuten sähkö- ja magneettikentissä, mutta tässä osiossa arvioidaan ainoastaan johtimissa ja muuntajissa tapahtuvia resistiivisiä lämpöhäviöitä.

6.1.1 Johtimet

Johtimien resistanssi on voimakkaasti riippuvainen taajuudesta, sillä aiemmin mainitun virranahdo ilmiön (kts. 2.3.1) seurauksesta johtimen resistanssi kasvaa taajuuden noustessa. Sähköjohtimet ovat muodoltaan sylinterimäisiä, jonka vuoksi niitä voidaan matemaattisesti tarkastella sylinterikoordinaatistossa. Tässä tarkastelumenetelmässä voidaan hyödyntää sylinterikoordinaatistossa yleisesti käytettyjä erikoisfunktioita, Besselin funktioita. Lähteessä [34] on esitetty laskentatapa johtimen resistanssin arvioimiseksi eri taajuuksille;

$$R_j = R_0 \frac{x}{2} \left[\frac{ber(x)bei'(x) - bei(x)ber'(x)}{(ber'(x))^2 + (bei'(x))^2} \right] \quad (12)$$

jossa R_0 on johtimen tasavirtaresistiivisyys (Ω/km). Kaavassa (12) ensimmäisen lajin Besselin funktion reaaliosa ber ja imaginaariosa bei ovat määritelty nollannen kertaluvun Besselin funktion mukaan;

$$J_0(xj\sqrt{j}) = ber(x) + jbei(x) \quad (13)$$

jossa j on imaginaariyksikkö. Kaavoissa (12), (13) ja (16) muuttuja x on määritelty seuraavasti;

$$x = \sqrt{\frac{8\pi f}{R_0 \cdot 10^4}} \quad (14)$$

jossa f on taajuus. Johtimen resistiivisyyden taajuusriippuvuutta voidaan alhaisilla taajuuksilla approksimoida, jolloin Besselin funktioilla kuvattu kaava (12) saadaan esitettyä yksinkertaisessa muodossa;

$$R_j = R_0(1 + y_s) \quad (15)$$

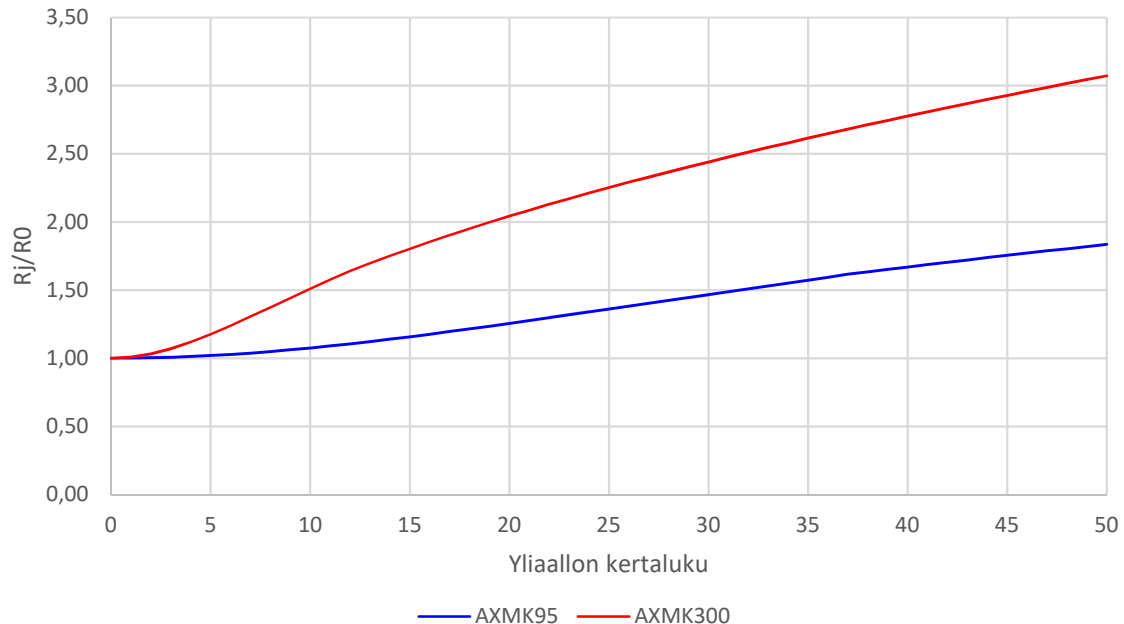
jossa muuttuja y_s on määritelty seuraavasti:

$$\begin{cases} y_s = \frac{x^4}{192 + 0,8x^4}, & 0 < x \leq 2,8 \\ y_s = -0,136 - 0,0177x + 0,0563x^2, & 2,8 < x \leq 3,8 \\ y_s = -0,733 + 0,354x, & x > 3,8 \end{cases} \quad (16)$$

Yliaalloista vaikuttavimmat kertakuvut ovat taajuusluokassa 100–2500 Hz, joka on riittävän alhainen taajuus, että voidaan käyttää approksimoitua kaavaa johtimen resistiivisyyden määrittämiseksi. Tällöin muuttujan x arvo ei nouse paljon yli 3,8, jolloin johtimen resistiivisyyden taajuusriippuvuutta ei approksimoida huomattavaa määrää lineaarisena.

Kaapelien ja ilmajohtojen resistiivisyyden suuruus määräytyy johtimen materiaalista ja johtimen paksuudesta. Lisäksi resistiivisyyteen vaikuttaa myös muita tekijöitä kuten lämpötila, mutta oletetaan nämä muut tekijät vakioiksi tässä tapauksessa. Yleisiä sähköverkon johdinmateriaaleja on kupari ja alumiini. Näistä kuparilla on alhaisempi ominaisresistanssi, joka tekee siitä paremman johtimen häviöiden vähentämisen kannalta. Kupari on kuitenkin materiaalina kalliimpaa kuin alumiini, jonka vuoksi alumiini on hyvin yleisesti käytetty johdinmateriaali. Johtimen paksuus vaikuttaa tuntuvasti resistiivisyyteen. Paksumpi kaapeli tai ilmajohto sallii enemmän kuormaa siirrettäväksi, sekä paksummalla johtimella on pienempi resistiivisyys. Johtimen paksuudella on kuitenkin käänteinen vaikutus yliaaltojen aiheuttamaan resistiivisyyden nousuun. Paksummalla johtimella korkeampitaajuiset virrat aiheuttavat suhteessa suuremman resistiivisyyden nousun kuin ohuemmissa johtimissa. Kuvassa 26 nähdään yleisesti käytetyn kaapelityypin AXMK

kahden eri paksuisen kaapelin resistiivisyyden nousu yliaalloilla. Resistiivisyyksien arvot ovat suhteutettuna kaapelien tasavirtaresistiivisyyksiin, jotka ovat 0,320 Ω/km AXMK95-kaapelille ja 0,100 Ω/km AXMK300-kaapelille. Kaapelityypissä numeroarvolla tarkoitetaan yhden vaiheen johtimen poikkipinta-alaa millimetreissä. Resistiivisyyden arvot ovat saatu lähteestä [35], jotka ovat määritelty 20° lämpötilassa.



Kuva 26: AXMK95 ja AXMK300 kaapelin resistiivisyyden riippuvuus yliaallosta suhteutettuna tasavirtaresistiivisyyteen.

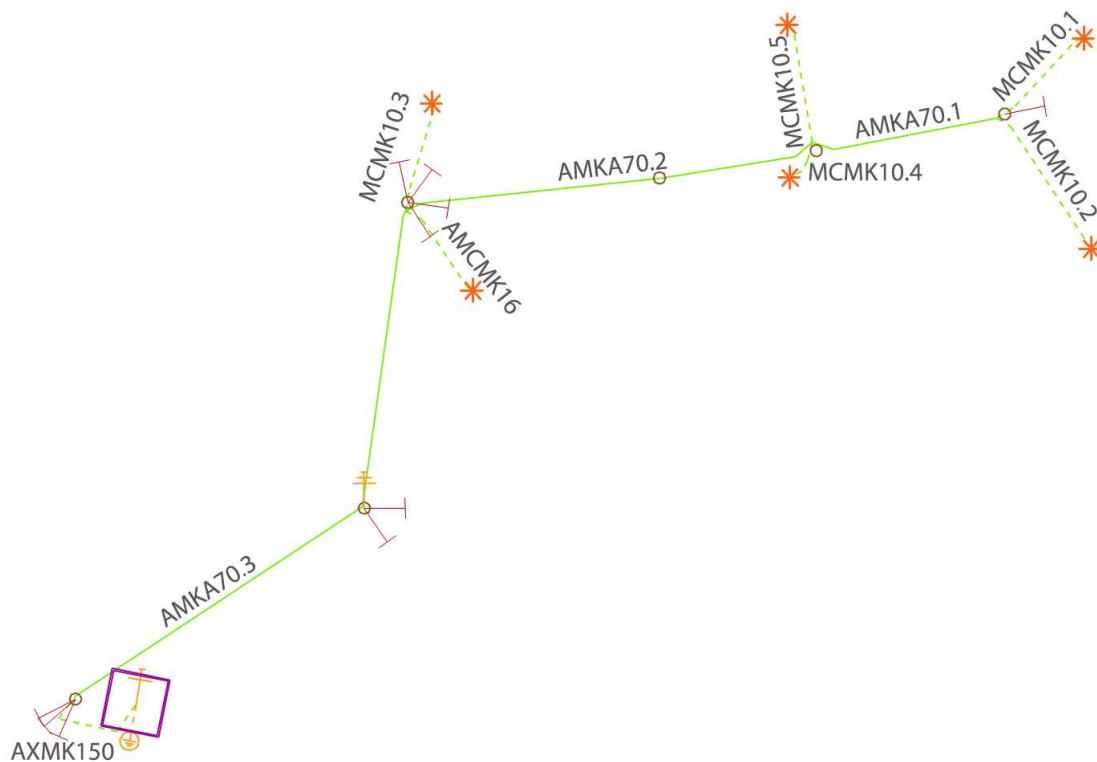
Häviöt voidaan laskea kaavan 17 mukaan, jossa I on johtimessa kulkeva virta ja R johtimen resistanssi. Sähköverkon johtimessa häviöt voidaan jaotella perustaajuudella tapahtuviin häviöihin ja yliaaltojen aiheuttamiin häviöihin. Perustaajuudella koituneet häviöt ovat esitetty kaavassa 18, jossa l ilmaisee vaihetta ja R_1 johtimen resistanssia 50 Hz taajuudella. Yliaalloille saadaan samaan tapaan niistä koituneet häviöt kaavan 19 avulla. Tässä jokaiselle yliaallolle täytyy määrittää sen kuljettama virta vaiheittain ja sille ominainen resistanssi sillä taajuudella.

$$P_h = I^2 R \quad (17)$$

$$P_{h, \text{johto}, 50 \text{ Hz}} = \sum_{l=1}^3 I_l^2 R_1 \quad (18)$$

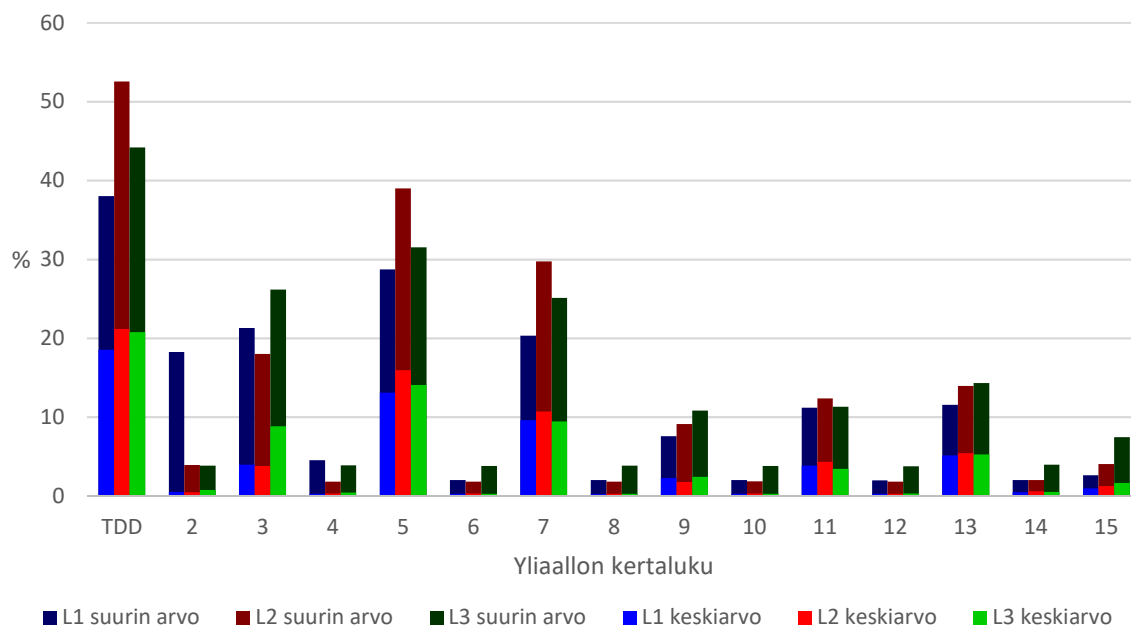
$$P_{h, \text{johto}, \text{yliaallot}} = \sum_{l=1}^3 \sum_{n=2}^N I_{l,n}^2 R_n \quad (19)$$

Carunan verkossa eräällä muuntamolla tehtiin sähkönlaatumittauksia hetkellisärvomittarilla, joka otti mittaustuloksia minuutin välein. Muuntamossa mitattiin yhtä lähtöä vähän yli kolmen päivän ajan, joka syöttää sähköä kuudelle omakotitaloliittymälle. Mitattu verkko-osa on esitetty kuvassa 27. Verkon runko koostuu suurimmaksi osaksi ilmajohdosta ja liittymien liittymisjohtimet kaapeleista. Kuvaan 27 on merkattu johtimien tyyppi ja ne ovat numeroitu, jos verkko koostuu useammasta samantyyppisestä johtimesta.



Kuva 27: Hetkellismitatun muuntamon lähdön verkko.

Hetkellismitatun muuntamon lähdön mitatut harmoniset yliaaltovirrat vaiheittain nähdään kuvassa 28, jotka ovat suhteellisarvoja muuntamon lähdön syöttämästä virrasta. Yliaaltovirtojen kokonaiskuormansäro TDD on laskettu kaavan 10 avulla. Virran säröytymä saa melko korkeita arvoja, joka on yleistä virtamittauksissa. Virran säröytymällä ei ole kuitenkaan suurta vaikutusta jännitteen säröön, sillä mittauksen aikana jännitteen kokonaissäroille saatiin keskimäärin 1,25 %. Mitatuilla kohteilla ei ole siis suurta vaikutusta verkon arvoihin tai sähkönlaatuun.



Kuva 28: Hetkellismitatun muuntamon yhden lähdön kolmen päivän mittaisen ajanjakson harmoniset yliaaltovirrat vaiheittain prosentteina kuormavirrasta.

Arvioidaan seuraavaksi hetkellismitatun muuntamon lähdössä koituvia häviöitä johtimissa. Tarkastellaan vain johtimissa tapahtuvia resistiivisiä häviöitä ilman lämpötilan vaikutusta, sillä mittaustuloksissa ei ole mitattu johtimien lämpötiloja. Oletetaan myös, että jokaisella johtimella on samanlainen yliaaltovirtakarakteristiikka. Taulukossa 16 nähdään mitatun verkko-osan lähtöarvot. Mitatut virran arvot ovat suoritettu muuntamossa lähdön kohdalla, jolloin eri johtimien osille täytyy arvioida niissä kulkeva virta mittauksen aikana. Carunan kulutustietojen ja verkkotietojärjestelmän Trimble NISin avulla saadaan mitatun verkko-osan johtimille niissä suurin laskelmallisesti kulkenut virta, joka on merkitty I_{\max} taulukossa 16. Laskemalla johdinosien suurimman virran suhdearvo muuntamon lähdön suurimpaan arvoon $I_{\max, \text{tot}}$, voidaan arvioida mitattujen virtojen suuruutta siinä johdinosassa. Tämä on tehty laskelmissa kertomalla mitatut virran arvot taulukossa 16 esitetyillä prosenttiarvoilla virtojen suhteelle. Laskelmat ovat tehty kaavojen 15, 18, ja 19 avulla, joissa jokaiselle mitatulle minuutin hetkellisarvolle on laskettu häviön suuruus.

Taulukko 16: Hetkellismitatun muuntamon lähdön lähtötiedot verkon johtimille. $I_{\max, \text{tot}} = 80,4 \text{ A}$ on muuntamon lähdön suurin virta, tasavirtaresistiivisyyksien R_{DC} arvot ovat saatu lähteestä [35] ja keskimääräinen Spot-hinta vuodelle 2017 on saatu Nord Poolin tilastoista [36].

Tyyppi	Pituus (m)	I _{max} (A)	$\frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{max,tot}}}$ (%)	R _{DC} $\frac{\Omega}{\text{km}}$	Spot-hinta snt/kWh
AMKA70.1	32,15	31,0	39	0,433	3,3207
AMKA70.2	71,25	57,1	71		
AMKA70.3	109,85	80,4	100		
AMCMK16	18,24	15,7	20	1,910	
AXMK150	20,42	80,4	100	0,206	
MCMK10.1	20,49	23,0	29	1,830	
MCMK10.2	27,76	12,0	15		
MCMK10.3	20,64	15,4	19		
MCMK10.4	7,58	23,5	29		
MCMK10.5	19,05	15,1	19		

Lasketut häviöt ja niistä koituneet kulut Carunalle on koottu taulukkoon 17. Häviöiden suuruus on voimakkaasti riippuvainen virrasta, jonka vuoksi runkoverkossa nähdään suurimmat häviöt. Runkoverkko on tämän lisäksi pisin osa verkkoa, jolloin johtimen resistanssi nousee ja häviöiden määrä sen myötä. Yliaaltojen aiheuttamien häviöiden osuus kokonaishäviöistä vaihtelee johtimen tyyppin mukaan, mutta keskimääräisesti niiden osuus on hieman yli 2,5 % kokonaishäviöistä. Taulukossa 17 on vielä arvioitu taloudelliset kustannukset häviöistä tämän kolmen päivän mittausajanjakson aikana. Laskelmissa on oletettu häviöissä kuluneen sähköenergian hinnaksi taulukossa 16 esitetty keskimääräinen vuoden 2017 Spot-hinta. Häviöiden kustannukset ovat melko suuret, sillä kohdetta mitattiin vain kolmen päivän ajan ja mitatun verkon yhteispituus on noin 350 m. Carunan koko verkon pituus on 85000 km, jolloin vuotuiset kustannukset häviöistä ovat merkittävät yhtiölle. Lisäksi tämä mitattu kohde sisälsi ainoastaan pienen kulutuksen omakotitaloja, joiden aiheuttamat yliaallot ovat vähäisiä. Teollisuuskohteita sisältävässä verkossa on suuremmat virrat ja myös yliaaltojen määrä on useimmiten korkeampi. Näissä verkon osissa on oletettavasti huomattavasti suuremmat häviöt perustajuudella sekä yliaalloilla.

Taulukko 17: Hetkellisesti mitatun muuntamon lähdön häviöt johdinosittain.

Tyyppi	$P_{h,50 \text{ Hz}}$ (kWh)	$P_{h,yliaallot}$ (kWh)	$\frac{P_{h,yliaallot}}{P_{h,tot}}$ (%)	$P_{h,50 \text{ Hz}}$ (snt)	$P_{h,yliaallot}$ (snt)
AMKA70.1	0,0898	0,0023	2,5416	0,2983	0,0078
AMKA70.2	0,6754	0,0176	2,5416	2,2427	0,0585
AMKA70.3	2,0646	0,0538	2,5416	6,8557	0,1788
AMCMK16	0,0563	0,0014	2,5026	0,1871	0,0048
AXMK150	0,1787	0,0049	2,6742	0,5934	0,0163
MCMK10.1	0,1301	0,0033	2,5028	0,4321	0,0111
MCMK10.2	0,0480	0,0012	2,5028	0,1594	0,0041
MCMK10.3	0,0588	0,0015	2,5028	0,1952	0,0050
MCMK10.4	0,0502	0,0013	2,5028	0,1669	0,0043
MCMK10.5	0,0521	0,0013	2,5028	0,1732	0,0044
Yhteensä	3,4041	0,0889	2,5440	11,3038	0,2951

6.1.2 Muuntajat

Muuntajissa tapahtuu häviöitä pääosin sen rautasydämessä ja johtimissa. Näistä rautasydämessä tapahtuvat häviöt voidaan jakaa edelleen hystereesi- ja pyörrevirtahäviöihin. Hystereesihäviöt johtuvat muuntajan rautasydämen magnetisoitumisesta. Tällä tarkoitetaan, että rautasydän jää vielä magneettiseksi hetken aikaa virran katkaisemisen jälkeen. Pyörrevirtoja syntyy muuntajan rautasydämessä muuttuvan magneettikentän vaikutuksesta. Muuttuva magneettikenttä indusoi rautasydämessä virtoja, jotka aiheuttavat häviöitä. Muuntajassa tapahtuvat johdinhäviöt ovat pääosin resistiivisiä häviöitä muuntajan käämityksissä sekä muissa johtimissa.

Yliaaltojen aiheuttamat lisähäviöt hystereesissä näkyvät niiden aiheuttamissa lisäsilmuoissa magneettivuontiheyteen [34]. Tätä voidaan arvioida korjauskertoimella k_h , joka on esitetty lähteessä [34]. Korjauskerroin määritellään seuraavasti;

$$k_h = 1 + k\Delta B_T, \quad (20)$$

jossa k on materiaalista riippuva vakiokerroin ja yliaaltojen aiheuttamat lisäsilmut magneettivuontiheyteen määritellään;

$$\Delta B_T = \frac{1}{B} \sum_n \Delta B_n \quad (21)$$

jossa B on magneettivuontiheyden huippuarvo ja ΔB_n on yliaalloista johtuvat poikkeamat magneettivuontiheyteen.

Pyörrevirtahäviöissä näkyvät lisähäviöt yliaaltojen vaikutuksesta voidaan arvioida lähteen [34] mukaan korjauskertoimella;

$$k_p = \left(\frac{U_1}{U}\right)^2 \sum_{n=1}^N \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2 \quad (22)$$

jossa tehollisarvolliset jännitteet ovat: U_1 perustaajuuden jännite, U sinimuotoinen referenssijännite, jolla on sama huippuarvo kuin perustaajuuden jännitteellä ja U_n on kertaluvun n yliaallon jännite. Yliaalloista aiheutuneet lisähäviöt pyörrevirtahäviöihin ovat kuitenkin hyvin vähäisiä. Korkealla 10 % kokonaissärönarvolla on ainoastaan 1 % lisähäviövaikutus pyörrevirtahäviöihin. [34]

Muuntajassa aiheutuvat resistiiviset johdinhäviöt voidaan laskea kuten tavallisissa johtimissa koituneet häviöt käyttäen kaavoja (17)–(19). Muuntajissa sisäinen resistanssi kasvaa yliaaltojen vaikutuksesta kuten johtimissa, mutta sen arvioimisessa käytetään eri menetelmää. Yliaaltokohtaiset muuntajan resistanssit voidaan arvioida lähteessä [34] esitellyllä approksimoidulla kaavalla;

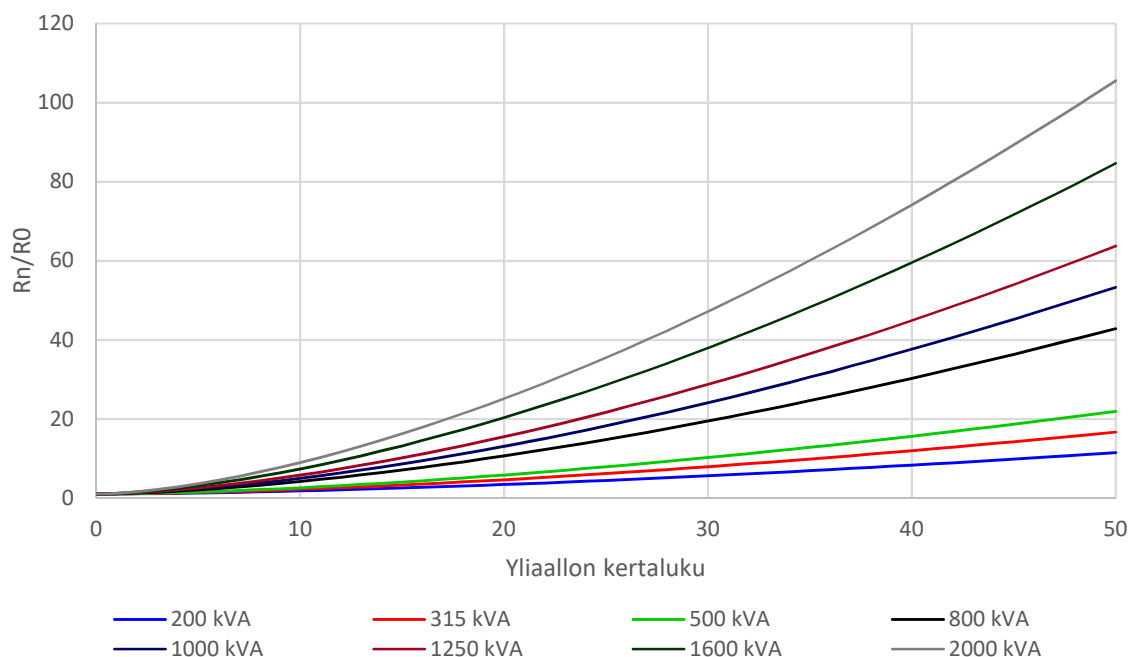
$$R_n = R_0(1 + \alpha n^x) \quad (23)$$

jossa R_0 on muuntajan tasavirtaresistanssi, α on jakelumuntajasta riippuva kerroin, jonka arvoja on esitetty taulukossa 18, n on yliaallon kertaluku ja x on empiirisesti määritelty arvo, joka on jakelumuntajille 1,6 ja suurmuuntajille 1,7–1,9.

Taulukko 18: Jakelumuntajien α -arvoja. [34]

S_N(kVA)	200	315	500	800	1000	1250	1600	2000
α	0,02	0,03	0,04	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20

Muuntajissa yliaalloista aiheutuneiden lisähäviöiden määrä suhteessa perustaajuuden häviöihin kasvaa voimakkaasti muuntajan nimellistehon mukaan. Kuvassa 29 nähdään tämä riippuvuus muuntajan koon ja sen resistanssin kasvu yliaaltojen mukaan, jotka ovat suhteutettuna tasavirtaresistanssiin. Suuremmissa jakelumuntajissa yliaalloista koituvat lisähäviöt voivat kasvaa huomattavan suureksi, jos verkon kuorma on kovin yliaaltopitoinen.



Kuva 29: Eri muuntajien resistanssin kasvu yliaalloilla suhteutettuna tasavirtaresistanssiin.

Tehdään seuraavaksi vastaava arviointi muuntajassa aiheutuneissa häviöistä kuin aiemmassa kohdassa (kts. 6.1.1) tehtiin muuntamon lähdön syöttämässä verkossa. Yliaaltojen aiheuttamat lisähäviöt voidaan arvioida kaavan 23 antaman resistanssin ja mitattujen virtatietojen avulla. Muuntamon muuntaja on kooltaan 100 kVA, jolloin oletetaan sen α -arvoksi taulukon 18 mukaan 0,01. Muuntajan x-arvo on 1,6 ja muuntajan yliaaltoriippuvuisten resistanssien määrittämiseksi tarvitaan vielä tietoon muuntajan tasavirtaresistanssi R_0 . Carunan verkkotietojärjestelmässä muuntajan suhteelliseksi oikosulkuimpedanssiksi on merkitty 1,492 %, joka vastaa muuntajassa aiheutuvia häviöitä. Arvioidaan tämän suhteen avulla muuntajan tasavirtaresistanssi R_0 siten, että lasketaan jokaiselle mitatulle 50 Hz taajuiselle virralle siinä kuluneet häviöt. Näitä laskettuja 50 Hz häviöitä verrataan muuntamolla mitattuun pätötehoon, joka on muuntajan sen hetkinen kuorma. Laskelmissa muutetaan kaavassa 23 olevan tasavirtaresistanssin R_0 arvoa, kunnes laskettujen 50 Hz taajuisien häviöiden keskimääräinen suhde on 1,492 % muuntajan syöttämästä kuormasta. Tällä menetelmällä muuntajan tasavirtaresistanssiksi saadaan 0,171 Ω .

Muuntajassa aiheutuneet häviöt ja niiden kustannukset mittausjakson aikana voidaan arvioida käyttäen kaavaa 19, jossa jokaiselle vaiheelle ja yliaallolle saadaan omat häviöt. Taulukkoon 19 on koottu muuntajassa aiheutuneet häviöt perustaajuudella ja yliaalloilla. Arvot ovat saatu laskemalla jokaisen mitatun virta-arvon aiheuttama häviö muuntajassa ja summaamalla nämä arvot koko mittausajan yli. Yliaaltojen näkemä muuntajan resistanssi on saatu kaavan 23 avulla. Tuloksista huomataan, että muuntajassa koituu yli kaksi kertaa enemmän häviöitä mittauksen aikana kuin muuntajan syöttämässä verkossa (kts. taulukko 17). Lisäksi yliaalloista koostuva häviöiden osuus on suurempi muuntajassa noin 3 %, kun verkon johtimissa se on noin 2,5 %. Muuntajien sisältämät pitkät käämitykset aiheuttavat paljon häviöitä, joka selittää niiden kohtuullisen suuret arvot. Taajuusriippuvuus vaikuttaa voimakkaasti muuntajan sisäiseen resistanssiin, jonka vuoksi yliaalloista aiheutuneet häviöt ovat suuremmat muuntajassa kuin verkossa. Tämä muuntaja on

kokoluokassaan melko pieni (100 kVA), ja yliaaltojen aiheuttamien häviöiden osuus kasvaa nopeasti muuntajan koon kasvaessa kuten kuvassa 29 on demonstroitu. Carunan verkossa on tuhansia 20/0,4 kV keskijännitemuuntajia ja niissä koituneet vuosittaiset häviöt voivat olla mittavia. Yliaaltojen eliminointi ennen niiden kulkua muuntajaan voi saada aikaan suuria säästöjä häviöissä.

Taulukko 19: Hetkellismitatun muuntamon muuntajan häviöt perustaajuudella ja 2.–15. kertaluvun harmonisilla yliaalloilla vaiheittain. Hintojen määrittämisessä on käytetty vuoden 2017 keskimääräistä 3,3207 snt/kWh Spot-hintaa [36].

P_h (kWh)	L1	L2	L3	Yhteensä	$\frac{P_{h,yliaallot}}{P_{h,tot}}$ %
50 Hz	2,5007	2,0954	2,9920	7,5881	2,9699
yliaallot	0,0660	0,0579	0,1083	0,2323	
Hinta (snt)					
50 Hz	8,3041	6,9581	9,9355	25,1976	
yliaallot	0,2193	0,1924	0,3595	0,7712	

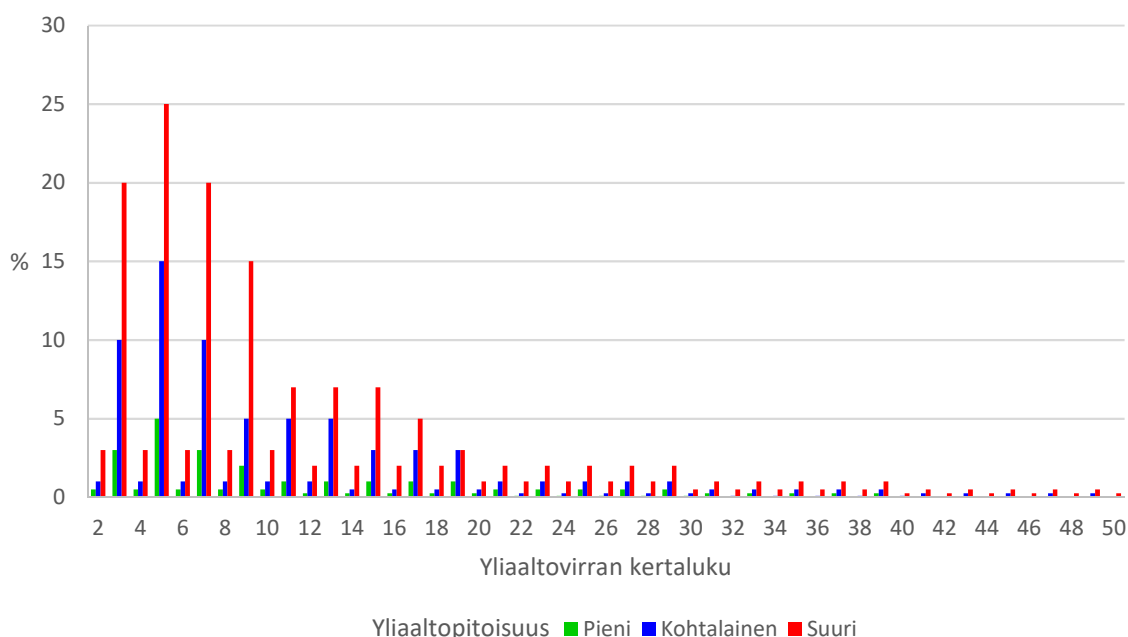
6.2 Yliaalloista aiheutuvat kulut

Sähköverkkoyhtiöt vastaavat verkossa tapahtuvista häviöistä. Sähköntuottajat ilmoittavat tuottamansa sähkön määrän ja sähkönkuluttajilta veloitetaan heidän kuluttamansa sähkö. Verkkoyhtiölle jää korvattavaksi vajaan jäänyt sähkön määrä, joka on kulunut sähkönsiirron ja -jakelun aikana. Carunan sähköverkossa aiheutuu vuoden aikana suuri määrä häviöitä, sillä verkkoa on todella paljon. Taulukossa 20 on esitetty Carunan eri verkkoalueilla aiheutuneet sähköiset häviöt vuosina 2017 ja 2016. Häviöiden absoluuttisella arvolla voisi kattaa vuodessa noin 20000 sähkölämmitteisen omakotitalon tai 200000 kerrostaloasunnon sähkönkulutuksen, jos oletetaan näiden vuotuisien sähkönkulutuksien olevan 20000 kWh omakotitalolle ja 2000 kWh kerrostaloasunnolle. Kuitenkin häviöiden suhteellinen arvo siirretyn sähkön kokonaismäärään on melko pieni. Häviöiden vähentämisellä saadaan silti merkittäviä säästöjä, jonka vuoksi verkkoyhtiön on hyvä seurata missä ja mistä häviöitä syntyy.

Taulukko 20: Carunan sähköverkossa koituneet häviöt.

Sähköverkon häviöt suhteutettuna siirretyn energian kokonaismäärään (%)	2017	2016
Caruna Oy alueverkko (110 kV)	0,6 % (40,1 GWh)	0,6 % (45,0 GWh)
Caruna Oy jakeluverkko	3,7 % (262,0 GWh)	3,6 % (261,4 GWh)
Caruna Espoo Oy jakeluverkko	2,5 % (77,7 GWh)	2,5 % (82,8 GWh)
Yhteensä	2,3 % (379,8 GWh)	2,2 % (389,2 GWh)

Yliaaltojen osuutta verkossa aiheutuneista häviöistä on hankala arvioida, sillä siihen vaikuttaa oleellisesti verkon yliaaltopitoisuus ja verkon johtimien sekä muuntajien tyytit. Tarkan arvon määrittämiseksi, verkossa täytyisi mitata yliaaltovirrat verkon jokaisessa johdinosassa, joka on käytännössä mahdotonta. Tämän lisäksi täytyisi tietää jokaisessa johdinosassa kulkevan virran suuruus, jotta häviöt saataisiin laskettua. Voimme kuitenkin kiertää tarpeen tuntea johtimessa kulkevan virran suuruuden, suhteuttamalla kaikki virran arvot kuormavirtaan. Arvioidaan seuraavaksi Carunan verkossa yliaaltojen aiheuttamia kustannuksia häviöiden kautta siten, että oletetaan koko verkossa olevan samankaltainen yliaaltokarakteristiikka. Tehdään vertailun vuoksi tarkastelu käyttäen kolmen eri pitoisuksien yliaaltokarakteristiikkaa, jotka ovat näkyvissä kuvassa 30. Verkon yliaaltovirtojen karakteristiikat ovat määritetty 50. harmoniseen kertalukuun saakka.

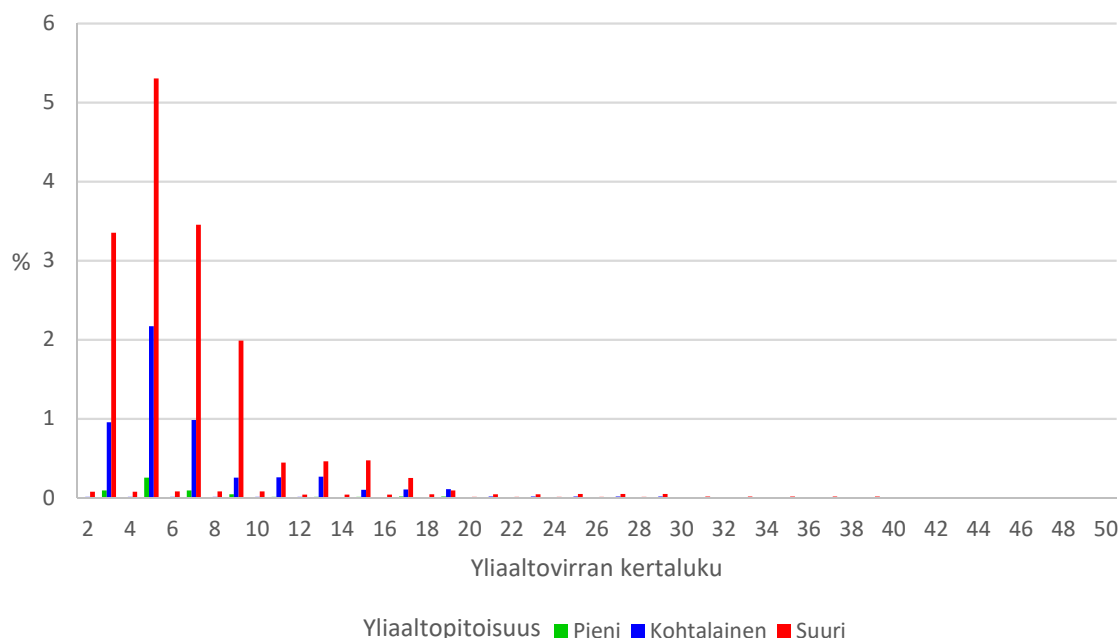


Kuva 30: Sähköverkon oletetut yliaaltokarakteristiikat suhteutettuna kuormavirtaan.

Johtimen yliaalloille ominaiset resistanssit määritellään kaavan 15 avulla ja niistä koituneet häviöt kaavan 7 avulla. Carunan sähköverkko koostuu useista ilmajohto- ja kaapelityypeistä, joiden resistiivisyys vaihtelee. Näiden johtimien tasavirtaresistiivisyys vaihtelee arvojen $0,1\text{--}1,92\ \Omega/\text{km}$ [35] välillä, joten käytetään tätä väliä häviöiden arvioimiseen. Kuvassa 31 on esitetty verkossa yleisesti käytetyssä AXMK 4x95 kaapelissa, jonka tasavirtaresistiivisyys on $0,32\ \Omega/\text{km}$ [35], koituneet häviöt yliaaltovirran komponenteilla. Yliaaltovirtojen yhteenlasketut osuudet kokonaishäviöistä eri yliaaltopitoisuuksilla ja johtimien tasavirtaresistiivisyyksillä ovat esitetty taulukossa 21.

Yliaalloista aiheutuneiden häviöiden määrä johtimissa näyttää olevan hyvin riippuvainen verkon yliaaltopitoisuudesta. Johtimen tasavirtaresistiivisyys kertoo oleellisesti johtimen paksuudesta sekä rakennemateriaalista. Tällä ei näytä olevan suurta vaikutusta yliaaltojen osuuteen häviöissä, sillä taulukossa 21 nähdään pientä muutosta verkossa ohuimman ja paksuimman käytetyn johtimen välillä. Yliaaltopitoisuudella puolestaan näyttää olevan suuri vaikutus yliaaltojen aiheuttamien häviöiden osuuden määrään, sillä se kas-

vaa nopeasti pitoisuuden noustessa. Tuloksista huomataan myös, että vaikuttavimmat yliaallot häviöihin ovat pienemmät kertaluvut. Tämä selittyy sillä, että suuremman kertaluvun harmoniset yliaallot ovat suhteessa pieniä verrattuna ensimmäisiin kertaluvun yliaaltoihin. Kuvassa 31 tämä nähdään yliaalloista aiheutuneiden häviöiden osuuden laskevan olemattomiin, kun ylitetään 20. kertaluvun harmoninen yliaalto. Näissä yliaaltokomponenteissa niiden suhteellinen arvo kuormavirrasta on 1 % tai alle.



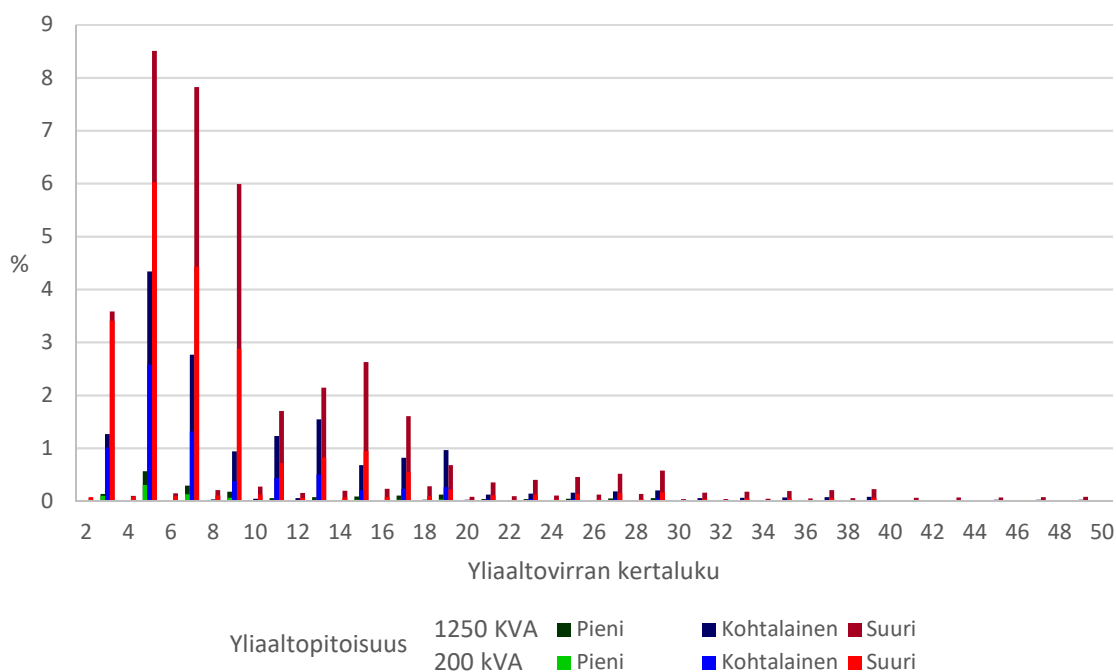
Kuva 31: Yliaalloista aiheutuneiden häviöiden suhteellinen osuus kokonaishäviöistä AXMK 4x95 kaapelissa.

Taulukko 21: Yliaalloista aiheutuneiden häviöiden summan suhteellinen osuus kokonaishäviöistä eri yliaaltopitoisuuksilla ja johtimien tasavirtaresistiivisyyksillä.

Yliaaltopitoisuus \ Tasavirtaresistiivisyys	Pieni	Kohtalainen	Suuri
1,91 Ω/km	0,5 %	5,1 %	16,2 %
0,32 Ω/km	0,6 %	5,3 %	16,7 %
0,1 Ω/km	0,7 %	6,5 %	19,8 %

Muuntajissa yliaaltojen osuus häviöistä kasvaa voimakkaasti muuntajan koon mukaan, kuten aiemmin todettiin (kts. 6.1.2). Toisin kuin johtimissa, muuntajissa niiden tasavirtaresistanssi ei vaikuta yliaaltojen suhteelliseen osuuteen häviöistä. Tämä selittyy sillä, että muuntajassa yliaaltojen näkemä sisäinen resistanssi muuttuu kaavan 23 mukaan yhtä paljon jokaisella yliaaltokomponenteilla riippumatta tasavirtaresistanssin suuruudesta. Tällöin ei tarvitse tietää verkossa käytettyjen eri muuntajien tasavirtaresistansseja, kun yliaaltovirrat suhteutetaan kuormavirtaan.

Kuvassa 32 nähdään kahden eri kokoisen muuntajan harmonisten yliaaltovirtojen suhteelliset osuudet kokonaishäviöistä. Muuntajien koot ovat valittu sillä perusteella, että 200 kVA on yleisesti käytetty muuntaja Carunan verkossa ja 1250 kVA muuntaja on oleellisesti suurin käytetty muuntajakoko. Yliaaltopitoisuudet ja niiden karakteristiikat ovat kuten johtimien tapauksessa, eli kuvan 30 mukaisesti. Taulukkoon 22 on koottu yliaalloista aiheutuneiden yhteenlaskettujen häviöiden suhteelliset arvot muuntajien kuormavirtaan eri yliaaltopitoisuuksilla. Tuloksista huomataan, että muuntajissa yliaaltopitoisuuden määrällä on samankaltainen vaikutus yliaaltojen häviöihin kuten johtimissakin. Muuntajan koolla on toisaalta myös voimakas vaikutus yliaaltojen aiheuttamiin häviöihin, jota ei havaittu johtimissa niiden tasavirtaresistiivisyyden muuttuessa. Yliaaltojen näkemä resistanssi muuntajassa nousee äkisti taajuuden kasvaessa, joka on esitetty aiemmin kuvassa 29. Tämä johtaa siihen, että muuntajissa oleellisesti häviöihin vaikuttavat myös suuremman kertakuvun harmoniset yliaaltovirrat. Muuntajissa häviöihin vaikuttavat yliaaltovirrat ovat 40. kertalukuun saakka, kun se oli johtimissa vain 20. kertalukuun asti. Suuremmissa kertaluvun harmonisissa yliaaltovirroissa niiden suhteellinen arvo kuormavirtaan on muuntajien tapauksessa 0,5 % tai alle.



Kuva 32: Yliaalloista aiheutuneiden häviöiden suhteellinen osuus kokonaishäviöistä eri muuntajissa.

Taulukko 22: Yliaalloista aiheutuneiden häviöiden summan suhteellinen osuus kokonaishäviöistä eri yliaaltopitoisuuksilla ja muuntajien ko'oilla.

Yliaaltopitoisuus	Pieni	Kohtalainen	Suuri
Muuntajan koko			
200 kVA	0,8 %	7,4 %	22,1 %
500 kVA	1,1 %	9,4 %	27,1 %
1250 kVA	2,0 %	16,2 %	40,8 %

Laskettujen tulosten perusteella johtimien ja muuntajien häviöille, voidaan tehdä arvio Carunan verkossa yliaalloista aiheutuville kuluille. Olettamalla verkkoyhtiön maksavan sähköisistä häviöistä vuoden 2017 Spot-hinnan mukaisesti, eli 3,3207 snt/kWh [36], saadaan häviöiden kustannukseksi taulukon 20 mukaan vuodelle 2017 yhteensä noin 12,6 miljoonaa euroa. Yliaaltojen osuus häviöistä koko verkkoalueella on vaikea arvioida näiden laskelmien perusteella, mutta oletetaan koko verkkoalueella yliaaltopitoisuuden olevan kuvan 30 mukaisesti pienestä kohtalaiseen. Vertailemalla johtimien ja muuntajien pienimpiä sekä suurimpia arvoja yliaaltojen osuuteen kokonaishäviöistä, päädytään arviomaan yliaaltojen koostavan 3–5 % kokonaishäviöistä. Tällöin saadaan yliaalloista aiheutuneiksi vuotuisiksi kuluiksi noin 380000–630000 euroa. Teoriassa tämän verran verkkoyhtiö voisi säästää kuluissaan, jos yliaallot saataisiin hävitettyä kokonaan verkosta. Yliaaltojen suodattaminen ja eliminointi on kuitenkin haastavaa ja kallista, joten verkkoyhtiön ei ole järkevä aloittaa systemaattisesti hävittämään verkon yliaaltopitoisuutta.

6.3 Yliaaltojen seuranta jatkossa

Carunan sähköverkossa ei tällä hetkellä seurata aktiivisesti verkon yliaaltopitoisuutta tai kuluttajien tuottamia yliaaltopäästöjä. Yliaaltoja tuottavien laitteiden määrän lisääntyessä verkossa on kuitenkin kannattavaa miettiä niiden seurannan aloittamista lähitulevaisuudessa. Sähköverkossa on hankala seurata laajasti ja tarkasti yliaaltoja, sillä niiden mittaamiseksi tarvitaan useimmiten siihen erikoistunutta mittalaitetta. Tämä on haastavaa ja kallista toteuttaa koko verkkoalueella. Tässä kappaleessa esitetään ideoita yliaaltojen seuraamiseksi ja seurattavien kohteiden valitsemiseksi.

Nykyisillä sähkönkulutusmittareilla pystytään seuraamaan monia sähkönlaadullisia muuttujia, mitä voidaan hyödyntää yliaaltojen seurannassa. Sähkönkulutusmittareita asennetaan jokaiselle käyttöpaikalle, jolloin verkon sähkönlaatua voidaan tarkkailla koko verkkoalueella. Näiden mittarien sähkönlaadun tarkkailukyky on kuitenkin vielä melko rajallinen. Caruna asentaa nykyisin kaikille käyttöpaikoille Echelonin valmistaman sähkönkulutusmittarin. Myös jo olemassa olevissa käyttöpaikoissa vanhat mittarit ovat suurimmaksi osaksi vaihdettu Echelonin mittareihin. Nämä mittarit kykenevät muodostamaan loki-ilmoituksen, jos mitatussa käyttöpaikassa ylittyy ennalta määrätty raja-arvo mitattavalle muuttujalle.

Yliaaltoja voidaan seurata Echelonin mittareilla tarkkailemalla jännitteen, virran tai näennäistehon kokonaissäröä. Mittari ei anna särölle mitattua lukuarvoa vaan ilmoittaa ainoastaan, jos asetettu raja-arvo on ylitetty. Tällä menetelmällä ei päästä kiinni mistä yliaallot ovat peräisin tai mistä harmonisista kertaluvuista yliaallot koostuvat. Menetelmää voidaan kuitenkin hyödyntää löytämään korkeasäeröiset käyttöpaikat, joita jatkotutkimalla tarkemmin esimerkiksi laatumittarilla saadaan selville mistä korkeat yliaaltopitoisuudet ovat peräisin. Carunalla ei ole tällä hetkellä otettu käyttöön kokonaissärön tarkkailuominaisuutta Echelonin mittareilla eikä niiden seuraamiselle ole kehitetty valvontajärjestelmää. Tämän kehittämisellä saisi verkkoyhtiölle karkean, mutta laajan tavan seurata verkon yliaaltopitoisuutta.

Verkkoyhtiön on järkevä suorittaa laatumittauksia suurissa sähkönkulutuskohteissa, sillä näissä kohteissa yliaaltopäästöt voivat olla huomattavan suuret. Tällöin ne aiheuttavat mahdollisesti häiriötä lähiverkkoon sekä lisähäviöitä verkkoyhtiön kuluiksi. Erityi-

sesti suuret teollisuuskohteet voivat aiheuttaa verkkoon paljon lisähäviöitä, kuten aiemmin arvioitiin (kts. 6.1). Suuri liittymä vaatii paksut liittymiskaapelit ja vahvan runkoverkon, jolloin yliaalloista aiheutuvien häviöiden osuus kasvaa näissä pienemmän ominaisresistiivisyyden kaapeleissa. Tämän lisäksi suuri liittymä vaatii isomman muuntajakoneen, jossa muuntajan koko vaikuttaa oleellisesti yliaalloista aiheutuneisiin häviöihin. Usein myös teollisuuskohteissa on tavanomaista korkeammat yliaaltopäästöt, joka aiheuttaa verkkoyhtiölle suuremmat kulut suurempien häviöiden seurauksesta. Carunan sähköverkossa voisi tutkia yliaaltopäästöisen suuren sähkönkulutuskohteen aiheuttamia vuotuisia kuluja verkkoyhtiölle häviöiden kautta ja tehdä arviointilaskelma, onko kannattavaa suodattaa kohteen yliaallot kulujen vähentämiseksi.

Sähköntuotantokohteita on kannattavaa seurata, jos niissä tuotetaan sähköä yliaaltopäästöisillä menetelmillä kuten aurinko- tai tuulivoimalla. Näissä kohteissa yliaaltoja voi esiintyä runsaasti eikä niissä ole välttämättä riittävää yliaaltojen suodattamista, jolloin verkkoon voi aiheutua häiriötä. Verkkoyhtiöissä ei ole kuitenkaan annettu tarkkoja määritteitä, mikä on häiriötä ja mikä ei. Tämän vuoksi on järkevä mitata potentiaalisia häiriönlähteitä, jotta verkkoyhtiöllä olisi valmiudet lähteä selvittämään ongelmaa, kun häiriö ilmenee. Tällaisia mitattavia kohteita voisi olla esimerkiksi suuret liittymät, joissa on yhdistettynä suuri tehoista paikallista sähköntuotantoa.

7 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin yliaaltoja Carunan sähköverkossa. Tarkoituksena oli selvittää millä tasolla verkon yliaaltopitoisuus on tällä hetkellä ja etsiä yliaaltojen lähteitä. Ennalta tunnettuja yliaaltojen lähteitä otettiin työn aikana tarkempaan tarkasteluun ja niiden vaikutusta Carunan verkkoon arvioitiin. Työssä laskettiin yliaalloista aiheutuvien häviöiden määrää ja niistä koituvia kustannuksia verkkoyhtiölle. Lopussa mietittiin mitä keinoja on jatkossa seurata yliaaltoja Carunan verkossa ja minkälaisia kohteita kannattaisi seurata yliaaltopäästöjen varalta.

Carunan sähköverkon yliaaltopitoisuutta tutkittiin verkossa tehtyjen laatumittausten avulla. Laatumittauksia on tehty Carunan verkossa vuodesta 2012 lähtien ja niitä on määrällisesti hieman yli sata. Mittaukset ovat tehty eri puolella Suomea Carunan sähköverkossa, mutta otoksen suuruus kaikista Carunan 670000 mitattavasta kohteesta on pieni. Tuloksista saadaan kuitenkin suuntaa antava käsitys Carunan verkon yliaaltopitoisuudesta, joka on sähkönlaadun kannalta matalalla tasolla. Kaikkien laatumitattujen kohteiden keskiarvostettu jännitteen kokonaissärön arvo on alle 1 %, joka jää huomattavasti alle sähkönlaadun standardin SFS-EN 50160 salliman 8 % rajan. Laatumitatuissa kohteissa ei saatu mitattua kuin 3., 5. ja 7. kertaluvun harmoniset yliaaltojännitteet, joiden keskiarvostetut arvot jäävät myös alle standardin sallimien rajojen. Mittauksien avulla vertailtiin myös kaupunki- ja haja-asutusalueiden eroavaisuuksia yliaaltopitoisuuksissa. Tässä vertailussa todettiin, että näiden asutusalueiden välillä ei ole huomattavaa eroa niiden yliaaltopitoisuuksissa. Carunan sähköverkossa yliaaltopitoisuus on tämän tutkimuksen mukaan hyvällä tasolla.

Työssä otettiin tarkempi katsaus tunnettuihin yliaaltojen lähteisiin. Näitä ovat esimerkiksi tuulivoimalat, aurinkopaneelit ja sähköautojen latauspisteet, joita liitetään Carunan sähköverkkoon kiihtyvällä tahdilla. Tuulivoimaloiden tapauksessa tuloksissa huomattiin selviä kohonneita yliaaltojen arvoja voimalan tuottaessa sähköä verkkoon. Yliaaltopäästöjen karakteristiikkaa ei kuitenkaan saatu selville näiden mittauksien avulla, sillä tuulivoimaloiden yliaaltopäästöt painottuvat 40.–60. harmonisille kertaluvuille, kun käytetyt laatumittarit mittasivat ainoastaan 7. kertalukuun asti. Tuulivoimaloiden jännitteen kokonaissärön korkea nousu sähköntuoton aikana indikoi siihen, että voimalassa syntyy korkeampia harmonisia yliaaltoja kuin mitä mittarilla voidaan mitata.

Työn aikana suoritettiin mittaus useampia aurinkopaneeleja sijaitsevassa kohteessa. Mittalaitteena käytettiin tavanomaista laatumittaria tarkempaa erikoismittaria, jolla saatiin mitattua yliaaltoja 170 kHz taajuuteen asti. Kohdetta mitattiin jakokaapista, johon on kytketty neljä liittymää, joissa kolmessa on aurinkopaneelit. Tuloksissa löydettiin aurinkopaneelien invertterien kytkentätaajuudesta aiheutuva 20 kHz taajuuden yliaaltokomponentti. Tämä yliaaltokomponentti oli selvästi suurempi verrattuna muihin saman luokan taajuuden komponentteihin. Suurimmillaan 20 kHz taajuuden yliaaltokomponentti ylti kuitenkin vain 350 mV lukemiin, joten se ei ole merkittävä häiriö verkossa. Muut yliaallot, kuten standardissa määritetyt 2.–40. kertaluvun harmoniset yliaallot, olivat kaikki standardin sallimien rajojen sisällä. Aurinkopaneeleita mitatussa kohteessa verkko oli vahva, joten mittauksissa ei huomattu paneelien nostavat verkon yliaaltopitoisuutta. Aurinkopaneelien mahdolliset yliaaltopäästöt peittyvät verkon muiden yliaaltojen taakse, sillä kohteessa oli taustalla suhteellisen korkea jännitteen kokonaissärö.

Työssä tutkittiin tarkemmin erästä sähköautojen latauspistettä, joka on liitetty Carunan verkkoon. Kohteessa on kahden eri valmistajan sähköautojen pikalatauspisteitä, joihin molempiin asennettiin tätä työtä varten laatumittaukset. Mittaustulokset vahvistivat teoriassa esitettyä väitettä, että latauspisteiden tuottamat yliaallot voivat kasvaa paljon, jos muuntopiirissä ei ole riittävästi kompensoivaa lineaarista kuormaa. Mittaustuloksia analysoidessa hyödynnettiin Carunan verkkotietojärjestelmän dataa muuntajan kuormasta, jossa nähdään selviä kuormapiikkejä latauspisteiden ollessa aktiivisia. Tämä osoittaa sen, että latauspisteiden ottama kuorma on suhteessa suuri osa muuntajan kokonaiskuormasta, mikä aiheuttaa yliaaltojen runsaan nousun. Tuloksissa huomattiin, että sähköauton latauksen aikana jännitteen kokonaissärö kasvoi 160 % ja mitatuista harmonisista yliaalloista 3. kertaluvun yliaalto kasvoi jopa 1100 %. Nämä mitatut yliaallot jäivät silti reilusti alle standardien sallimien rajojen, mutta tulokset osoittavat sen, että latauspisteitä liittäessä verkkoon täytyy huomioida muuntopiirin lineaarisen kuorman riittävyys.

Yliaaltojen kulkeutumista sähköverkossa on hankala arvioida ilman useampaa mittauspistettä laajalta alueelta. Työssä tutkittujen kohteiden tulosten perusteella huomattiin, että yliaallot kulkeutuvat suhteellisen vaivatta verkossa. Samaan muuntopiiriin kytketyissä liittymissä havaittiin hyvin samankaltaiset yliaaltokarakteristiikat. Tämä viittaa siihen, että yliaallot kulkevat vapaasti muuntopiirissä ja vaikuttavat samalla tavalla kaikkiin muuntopiirin syöttämiin liittymiin. Yliaaltojen teoriaosassa käsiteltiin kolmansien harmonisten yliaaltojen häviämistä kolmio-tähtikytketyissä muuntajissa, ja tämä ilmiö havaittiin mitatuissa kohteissa useampaan kertaan. Tätä tietoa voidaan hyödyntää tutkiessa yliaaltojen lähdettä. Kohteessa, jossa on pieni kolmannen kertaluvun harmoninen yliaaltokomponentti ja korkea viides tai seitsemäs komponentti, voidaan olettaa yliaaltojen olevan peräisin muuntajan toiselta puolelta. Vastaavasti kolmannen yliaaltokomponentin ollessa suuri mittauspisteessä, voidaan olettaa yliaaltojen lähteen sijaitsevan muuntopiirissä.

Häviöt ovat yksi suurimmista yliaalloista aiheutuvista haitoista sähköverkolle. Yliaaltojen kuljettama teho muuttuu pääosin lämmöksi johtimissa ja verkon komponenteissa kuten muuntajissa. Tämä häviö summautuu perustaajuudella tapahtuvien häviöiden päälle, jolloin johtimien ja laitteiden suurin mahdollinen kuormitettavuus sekä käyttöikä kärsivät. Johtimissa ja muuntajissa yliaaltojen osuus kokonaishäviöistä kasvaa, mitä vähemmän resistiivinen johdin on tai mitä suurempi muuntajan nimellisteho on. Häviöistä aiheutuneet kulut jäävät verkkoyhtiön korvattavaksi, joten yliaaltojen vähentäminen verkossa tuo teknistaloudellista hyötyä verkkoyhtiölle. Yliaalloista aiheutuneet kulut Carunalle häviöiden kautta arvioitiin työssä olevan 380000–630000 euroa.

Työn lopussa pohdittiin keinoja seurata yliaaltoja Carunan sähköverkossa. Seuranassa voitaisiin hyödyntää sähkönkulutusmittareita, joita asennetaan jokaiselle käyttöpäikälle. Näissä mittareissa on kuitenkin hyvin rajoittunut kyky mitata yliaaltoja, joten tarkempia mittaustuloksia tarvittaessa on hyvä tunnistaa potentiaalisia yliaaltojen lähteitä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi suuret teollisuuden ja paikallisen sähköntuotannon liittymät. Yliaaltojen seuraaminen sähköverkossa tuo verkkoyhtiölle hyötyä teknillisessä näkökulmassa häiriöiden tunnistamisessa ja taloudellisessa mielessä häviöiden sekä komponenttien ikääntymisen vähentämisessä.

8 Lähdeluettelo

- [1] Electronics Tutorials, "Harmonics," [Online]. Saatavissa: <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/harmonics.html>. [Haettu 1 Helmikuu 2018].
- [2] Fluke Industrial B. V., *Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzers, Users Manual*, Almelo: Fluke Industrial B.V., 2008, p. 140.
- [3] J. Arrillaga ja N. R. Watson, *Power System Harmonics*, Toinen painos toim., Chichester: John Wiley & Sons, 2003.
- [4] S. Chattopadhyay, M. Mitra ja S. Sengupta, *Electric power quality*, New York: Springer, 2011.
- [5] D. Saxena, S. Bhaumik ja S. N. Singh, "Identification of Multiple Harmonic Sources in Power System Using Optimally Placed Voltage Measurement Devices," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, osa/vuosik. 61, nro 5, pp. 2483 - 2492, 2014.
- [6] R. Alanen ja H. Hätönen, "Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta, State of art -selvitys," VTT, Espoo, 2006.
- [7] Prysmian Group, "10-20 kV keskijännitekaapelit," 2017. [Online]. Saatavissa: <https://fi.prysmiangroup.com/sahkonjakeluverkko/10-20-kV-keskijannitekaapelit>. [Haettu 1 Elokuu 2018].
- [8] L. Yilu ja W. Zhenyuan, "Modelling of Harmonic Sources 3/4 Magnetic Core Saturation," Virginia Tech, Blacksburg, VA, 1998.
- [9] T. Ackermann, *Wind power in power systems*, Tukholma: John Wiley & Sons, 2005.
- [10] L. Korpinen, "Yliaalto-opus," 1998. [Online]. Saatavissa: <http://leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>. [Haettu 13 Tammikuu 2018].
- [11] Bayod-Rújula ja A. A, "Future development of the electricity systems with distributed generation," *Energy*, osa/vuosik. 34, nro 3, pp. 377 - 383, 2009.
- [12] M. C. Benhabib, J. M. A. Myrzik ja J. L. Duarte, "Harmonic effects caused by large scale PV installations in LV network," tekijä: *Electrical Power Quality and Utilisation - 9. kansainvälinen konferenssi*, Barcelona, 2007.
- [13] S. K. Khadem, M. Basu ja C. M. F, "Power Quality in Grid connected Renewable Energy Systems: Role of Custom Power Devices," tekijä: *Renewable Energies and Power Quality - kansainvälinen konferenssi*, Granada, 2010.
- [14] Suomen Standardisoimisliitto SFS, *SFS-EN 50160 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet*, 4 toim., SFS, 2010, p. 63.
- [15] P. T. Staats, W. M. Grady, A. Arapostathis ja R. S. Thallam, "A Statistical Method for Predicting the Net Harmonic Currents Generated by a Concentration of Electric Vehicle Battery Chargers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, osa/vuosik. 12, nro 3, pp. 1258 - 1266, 1997.
- [16] P. T. Staats, W. M. Grady, A. Arapostathis ja R. S. Thallam, "A Statistical Analysis of the Effect of Electric Vehicle Battery Charging on Distribution System Harmonic Voltages," *IEEE Transactions on Power Delivery*, osa/vuosik. 13, nro 2, pp. 640 - 646, 1998.

- [17] P. S. Moses, S. Deilami ja A. S. Masoum, "Power Quality of Smart Grids with Plug-in Electric Vehicles Considering Battery Charging Profile," tekijä: *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, São Paulo, 2010.
- [18] Z. Lin, F. Wen ja G. Ledwich, "Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, osa/vuosik. 28, nro 1, pp. 102 - 110, 2013.
- [19] Trafi, "Liikennekäytössä olevat sähköautot," Liikenteen turvallisuusvirasto, 18 Tammikuu 2018. [Online]. Saatavissa: https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset_autot. [Haettu 11 Helmikuu 2018].
- [20] V. Linja-aho, "Sähköautoon kotipistorasiasta jatkossa vain 8 ampeerin virtaa," *Elektroniikkalehti*, 12 Joulukuu 2016. [Online]. Saatavissa: http://etn.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=5562. [Haettu 11 Helmikuu 2018].
- [21] Tesla, "The Best Electric Car - Model S | Tesla," Tesla, Inc., [Online]. Saatavissa: <https://www.tesla.com/models>. [Haettu 11 Helmikuu 2018].
- [22] autoevolution, "NISSAN Leaf specs - 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017," autoevolution.com, [Online]. Saatavissa: https://www.autoevolution.com/cars/nissan-leaf-2010.html#aeng_nissan-leaf-2010-em61-109hp. [Haettu 11 Helmikuu 2018].
- [23] Nissan, "Prices & Specifications - Nissan LEAF 2018 - Electric Car | Nissan," Nissan Motor Company Ltd, [Online]. Saatavissa: <https://www.nissan.co.uk/vehicles/new-vehicles/leaf/prices-specifications.html#->. [Haettu 11 Helmikuu 2018].
- [24] J. Vuorinen, "Sähköbussin latausaseman laatumittaus," tekijä: *Helen Sähköverkko, Laatatutietojen hyödyntämisen kehitysryhmä*, Helsinki, 2017.
- [25] Linkker, "LINKKER 12+ Data sheet," 2 Tammikuu 2017. [Online]. Saatavissa: <http://s3.amazonaws.com/linkkerbus/wp-content/uploads/2016/08/01072722/Linkker-12-Data-sheet-2.1.2017.pdf>. [Haettu 11 Helmikuu 2018].
- [26] G. A. Putrus ja P. J. D. Suwanapingkarl, "Impact of Electric Vehicles on Power Distribution Networks," tekijä: *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, 2009.
- [27] L. Korpinen, "Muuntajat ja sähkölaitteet," 2012. [Online]. Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf. [Haettu 20 Tammikuu 2018].
- [28] P. Waide ja C. U. Brunner, "The global assessment," tekijä: *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*, Paris, International Energy Agency, 2011, pp. 11 - 12.
- [29] P. Robert, S. Ted ja M. Iain, "The potential impacts of grid-connected distributed generation and how to address them: A review of technical and non-technical factors," *Energy Policy*, osa/vuosik. 39, nro 10, pp. 6280 - 6290, 2011.
- [30] J. M. Guerrero, P. Chiang Loh, T.-L. Lee ja M. Chandorkar, "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids – Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC MicroGrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, osa/vuosik. 60, nro 4, pp. 1263 - 1270, 2013.

- [31] IEEE Standards Association, *IEEE Std 519-2014 - Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, New York: IEEE Power and Energy Society, 2014, p. 29.
- [32] T. Hoevenaars, K. LeDoux ja M. Colosino, "Interpreting IEEE STD 519 and meeting its harmonic limits in VFD applications," tekijä: *IEEE Industry Applications Society 50th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, 2003. Record of Conference Papers*, Houston, 2003.
- [33] J. DeDad, "Understanding Harmonic Indices," *Electrical Construction and Maintenance (EC&M) Magazine*, 1 Huhtikuu 2008. [Online]. Saatavissa: <http://www.ecmweb.com/design/understanding-harmonic-indices>. [Haettu 24 Tammikuu 2018].
- [34] M. Lehtonen, *Teknillisen korkeakoulun lisensiaatintyö - Yliaaltojen aiheuttamat häviöt ja niiden vaikutus komponenttien kuormitettavuuteen ja mitoitukseen teollisuussähköverkoissa*, Helsinki, 1988.
- [35] Tele-Fonika Kable, "sahkonumerot.fi," 17 Helmikuu 2010. [Online]. Saatavissa: <https://www.sahkonumerot.fi/0611231/doc/technicalinfodoc/>. [Haettu 6 Kesäkuu 2018].
- [36] Nord Pool, "Market Data," 30 Toukokuu 2018. [Online]. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Monthly/?dd=FI&view=table>. [Haettu 12 Kesäkuu 2018].